

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SISTEMA MECÁNICO ROTATIVO: CREO

Departamento de ingeniería mecánica



Trabajo Fin de Grado

Grado en ingeniería mecánica

Autor: Miguel Blanco Martín

Tutor: Juan Carlos García Prada

Co-director: Zoser Kalengayi Tshilumbu

JUNIO 215

Índice

1	Introducción	8
1.1	Motivación	8
1.2	Objetivos	8
1.3	Metodología de trabajo	9
2	Contenido	10
3	Antecedentes históricos.....	11
4	Mecánica de la fractura.....	13
4.1	Historia de la fractura.....	13
4.2	Fractura cuasi-estática	14
4.3	Tenacidad a la fractura.....	17
4.4	Agrietamiento por corrosión con esfuerzo ante carga estática.....	18
4.5	Tipo de carga	19
4.5.1	Carga estática	19
4.5.2	Carga dinámica	19
4.6	Tipo de la fractura	20
4.6.1	Nivel atómico	20
4.6.2	Nivel microscópico	20
4.6.3	Nivel macroscópico	21
4.7	Mecanismos de fractura.....	22
4.7.1	Teorías de rotura materiales dúctiles	23
4.7.2	Teorías de rotura para materiales frágiles	29
5	Fatiga.....	31
5.1	Características de rotura por fatiga	31
5.2	Crecimiento de la grieta	32
5.3	Relación vida-esfuerzo	34
5.4	Límite de resistencia a la fatiga	36

5.5	Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga	37
5.5.1	Factor de superficie (K_a)	38
5.5.2	Factor de tamaño (K_b)	39
5.5.3	Factor de confiabilidad (K_c)	40
5.5.4	Factor de temperatura (K_d)	41
5.5.5	Factor de modificación de efectos varios (K_e)	42
5.5.6	Factor de concentración de tensiones (K_f)	44
5.6	Caracterización de esfuerzos fluctuantes	46
5.7	Componentes variables de esfuerzo medio y amplitud	48
5.7.1	Criterio de Goodman	48
5.7.2	Criterio de Soderberg	49
5.7.3	Criterio de Gerber	50
5.7.4	Línea de carga	51
6	Ensayos no destructivos (END)	53
6.1	Inspección visual	53
6.2	Líquidos penetrantes	53
6.3	Partículas magnéticas	55
6.4	Corrientes inducidas o parásitas (Eddy)	56
6.5	Radiografías	56
6.6	Ultrasonidos	57
7	Planteamiento del problema	58
7.1	Diseño del eje	59
7.2	Condiciones de funcionamiento de eje	62
8	Análisis estático del eje fisurado	68
8.1	Creación de la grieta	68
8.2	Parámetros previos del análisis a fatiga	72
8.3	Análisis estático del eje fisurado	76
8.4	Fractura elasto-plástica	78

8.4.1	Parámetro CTOD	79
8.4.2	Resultados del parámetro CTOD	80
8.4.3	Hipótesis $K_{I\text{ mín}} = - K_{I\text{ máx}}$	82
8.5	Resultados tensión máxima y vida del componente.....	85
8.5.1	Resultado análisis estático	85
8.5.2	Resultado análisis a fatiga	86
9	Conclusiones.....	89
10	Presupuesto	91
11	Referencias bibliográficas	92
Anexo A. Factores de concentración de tensión teóricos (K_t)		94
Anexo B. Plano del eje.....		99
Anexo C. Desplazamiento labio izquierdo de la grieta (punto A).		100
Anexo D. Desplazamiento labio derecho de la grieta (punto B).		101

Índice de figuras

Figura 1. Fallo a fatiga de un eje de un automóvil.....	11
Figura 2. Placa de anchura $2b$ con grieta central y tensión longitudinal.....	15
Figura 3. Gráfica de relación K_1/K_0 en función de las dimensiones de la placa y la grieta.....	15
Figura 4. Placa con grieta transversal excéntrica	16
Figura 5. Placa con grieta en el borde.....	17
Figura 6. Modos de separar una placa.....	18
Figura 7. Cambio de tenacidad a la fractura con el tiempo	18
Figura 8. Tensión variable con el tiempo.....	20
Figura 9. Fractura intergranular y transgranular.....	21
Figura 10. Material dúctil y frágil.....	22
Figura 11. Tensiones normales y tangenciales.....	23
Figura 12. Círculo de Mohr para un ensayo de tracción simple	24
Figura 13. Círculos de compresión, tracción y cortante para definición de la falla por hipótesis de Mohr	27
Figura 14. Hipótesis de falla de Coulomb-Mohr para esfuerzos triaxiales.....	27
Figura 15. Comparación hipótesis de falla en materiales dúctiles.....	28
Figura 16. Comparación criterios de falla Coulomb-Mohr, Mohr modificada y esfuerzo normal máximo.....	30
Figura 17. Marcas características de rotura por fatiga	31
Figura 18. Regiones de evolución de una grieta.	32
Figura 19. Ensayo viga rotatoria	34
Figura 20. Diagrama S-N.....	35
Figura 21. . Límite de resistencia a la fatiga S_e frente a resistencia a la tensión S_{ut} para varios materiales.....	36
Figura 22. Desplazamiento de la gráfica a través de la ecuación de Marin	38
Figura 23. Falla debida a endurecimiento superficial	43
Figura 24. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes	45
Figura 25. Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes	45
Figura 26. Relaciones esfuerzo-tiempo	47
Figura 27. Criterios de falla en carga variable	50
Figura 28. Criterios de Goodman, Soderberg, Gerber y línea de fluencia	51
Figura 29. Línea de carga en el diagrama de Goodman	52
Figura 30. Procedimiento de líquidos penetrantes.....	54

<i>Figura 31. Ventajas e inconvenientes de los líquidos penetrantes.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32. Fugas de flujo</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33. Técnica de corrientes inducidas.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34. Defecto en radiografías.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35. Materiales diferentes en ultrasonidos</i>	<i>57</i>
<i>Figura 36. Eje mecánico de estudio.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 37. Entorno de “Creo Parametric”</i>	<i>59</i>
<i>Figura 38. Boceto de revolución del eje.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39. Eje por revolución.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 40. Redondeos en eje</i>	<i>61</i>
<i>Figura 41. Eje modelado en 3D</i>	<i>61</i>
<i>Figura 42. Características del material</i>	<i>62</i>
<i>Figura 43. Opciones de “Creo Simulate”</i>	<i>63</i>
<i>Figura 44. Carga aplicada</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45. Restricciones mecánicas.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 46. Mallado 10mm y mallado 5mm</i>	<i>64</i>
<i>Figura 47. Fuerza de gravedad.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 48. Restricción por simetría.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 49. Distribución de tensiones del eje sin fisura aplicando simetría.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 50. Desplazamiento máximo del eje sin fisura aplicando simetría</i>	<i>66</i>
<i>Figura 51. Distribución de tensiones del eje completo.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 52. Desplazamiento máximo del eje completo</i>	<i>67</i>
<i>Figura 53. Zona crítica en boceto</i>	<i>68</i>
<i>Figura 54. Zona crítica en distribución de tensiones</i>	<i>68</i>
<i>Figura 55. Grieta en eje</i>	<i>69</i>
<i>Figura 56. Plano frontal eje fisurado.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 57. Boceto grieta</i>	<i>70</i>
<i>Figura 58. Definición de parámetros.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 59. Grieta terminada 3D</i>	<i>71</i>
<i>Figura 60. Puntos de medición</i>	<i>72</i>
<i>Figura 61. Gráfica de obtención de Kt.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 62. Gráfica de obtención de la sensibilidad a las ranuras “q”</i>	<i>74</i>
<i>Figura 63. Factor de concentración de tensiones en definición de material.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 64. Cuadro de análisis a fatiga.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 65. Desplazamiento labio izquierdo grieta en función de la profundidad de la grieta</i>	<i>77</i>

<i>Figura 66. Desplazamiento del labio derecho de la grieta en función de la profundidad de la grieta</i>	<i>77</i>
<i>Figura 67. Enromamiento de la grieta.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 68. Probeta a flexión con fisura</i>	<i>80</i>
<i>Figura 69. Fisura elíptica en barra circular.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 70. Fisura recta en barra circular</i>	<i>83</i>
<i>Figura 71. Evolución de ΔK_I con la profundidad de la grieta h.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 72. Tensión máxima en función de la profundidad de la grieta.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 73. Vida del componente en función de la profundidad de la grieta</i>	<i>87</i>
<i>Figura 74. Distribución logN a lo largo del eje para grieta de 2,93mm</i>	<i>87</i>
<i>Figura 75. Distribución logN en la fisura del eje para grieta de 2,93mm.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 76. Tensión máxima localizada en región III</i>	<i>89</i>
<i>Figura 77. Barra rectangular con agujero transversal sometida a tracción o compresión.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 78. Barra rectangular con agujero transversal sometida a flexión simple</i>	<i>94</i>
<i>Figura 79. Barra rectangular con dos muescas sometida a tracción o compresión</i>	<i>95</i>
<i>Figura 80. Barra con dos muescas sometida a flexión simple.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 81. Barra rectangular con estrechamiento y entalles sometida a tracción o compresión</i>	<i>96</i>
<i>Figura 82. Barra con estrechamiento y entalles sometida a flexión simple.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 83. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a tracción</i>	<i>97</i>
<i>Figura 84. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a torsor.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 85. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 86. Plano del eje</i>	<i>99</i>
<i>Figura 87. Desplazamiento labio izquierdo de la grieta (valores en mm).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 88. Desplazamiento labio derecho de la grieta (valores en mm).....</i>	<i>101</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Relación S_e/S_{ut} para varias clases de materiales</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Factor de superficie K_a.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Factor de confiabilidad K_c.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4. Determinación del parámetro CTOD.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 5. Valores de intensidad de tensiones.</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 6. Propagación de la grieta en hipótesis $K_{I\ min}=-k_{I\ máx}$.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 7. Presupuestos generales del proyecto</i>	<i>91</i>

1 Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, con el avance de las tecnologías y de la mayoría de los sectores (en especial el transporte), todo tipo de maquinaria y elementos mecánicos poseen gran importancia.

Debido a factores como la seguridad, el ahorro de costes y el ahorro de tiempo, es importante alargar la vida de los componentes lo máximo posible, así como el conocimiento de las causas que conllevan al fallo y métodos para evitar dichos fallos.

Este trabajo se centrará en el estudio de un eje ferroviario con el uso de un potente software actual llamado Creo Parametric 2.0.

Una gran parte de los fallos que se producen en servicio de máquinas rotatorias (turbinas, rotores...) se produce por la aparición y propagación de fisuras. Estas fisuras disminuyen la seguridad y la vida útil del componente, puesto que pueden llegar a producir una rotura catastrófica y repentina. Los ejes, que son uno de los principales componentes de las máquinas, trabajan en rotación bajo esfuerzos de flexión y torsión y pueden hacer propagar la fisura como consecuencia de la fatiga. Por ello es necesario el desarrollo de métodos fiables que permitan conocer las características de propagación de la grieta con el fin de prever el posible fallo.

1.2 Objetivos

Los objetivos en líneas generales de este proyecto son:

- La comprensión de la base teórica de la mecánica de la fractura, así como un breve marco histórico en el que se desarrolla. Comparación de diferentes criterios de fallo para diferentes materiales.
- Repaso de las técnicas de inspección más comunes y como se desarrolla cada una de ellas.
- Modelado y análisis de un eje ferroviario con una fisura, para poder estudiar su comportamiento y predecir situaciones de fallo futuras.

- A través de los resultados obtenidos con el software Creo Parametric, análisis de esos resultados para poder hacer predicciones sobre la posible propagación inestable de la grieta.

1.3 Metodología de trabajo

El trabajo se llevará a cabo en primer lugar abordando el estudio de la base de la mecánica de la fractura, comprendiendo los diferentes tipos de fractura y los diferentes mecanismos en función del tipo de material (dúctil o frágil). También se estudiará previamente las características y las etapas de desarrollo de la fatiga.

Una vez comprendida la base teórica, procederemos al estudio del funcionamiento del software Pro Engineer para poder familiarizarnos con la mayoría de los comandos y la interfaz del programa.

Tras comprender el software, diseñaremos y simularemos nuestro elemento mecánico (eje ferroviario) para poder obtener resultados útiles que analizar.

Gracias a la base teórica, se podrán establecer hipótesis y criterios que nos faciliten esa interpretación de resultados con la finalidad de predecir la propagación de la grieta.

2 Contenido

El documento se divide en dos partes gran diferenciadas, una teórica de mecánica de la fractura y una segunda referente al análisis de un eje rotativo con Creo Simulate.

En la primera parte, se explica el fundamento y la base teórica de la mecánica de la fractura, incluyendo un breve marco histórico, para después poder introducirnos en clasificaciones de la fractura, mecanismos de fractura con sus respectivas teorías para materiales dúctiles y materiales frágiles; y por último una explicación de las causas y el proceso de fallo por fatiga, además de métodos de inspección de defectos para evitar fallo prematuro (END).

En la segunda parte, se presenta el problema central del trabajo, en el que a partir de unos planos dados por el fabricante, se procede al diseño asistido por ordenador gracias al software Pro Engineer. Una vez diseñado, aplicaremos una serie de restricciones mecánicas de movimiento y una serie de fuerzas (gravedad, carga distribuida sobre la sección) para poder analizar la distribución de tensiones que se origina en la pieza. Dicha distribución será consecuencia de análisis llevados a cabo con la mitad del eje, en un primer momento sin grieta y después con ella. Se realizarán variaciones en los parámetros de la grieta, así como dos tipos de análisis (estático y a fatiga) para poder interpretar los resultados.

En el trabajo podemos encontrar un entorno socio-económico (presupuesto), que nos sirva como marco económico, así como la bibliografía correspondiente y anexos referidos a lo largo del trabajo. Todo correctamente acompañado de figuras y tablas convenientemente explicadas.

3 Antecedentes históricos

Con el paso de los años, la aplicación de los materiales al ámbito ingenieril ha dado lugar a numerosos problemas. En las épocas más actuales (principios del s.XIX), el principal material de uso ingenieril era metálico, sobre todo para aplicaciones en estructuras. Con el tiempo se dieron cuenta de que dichas estructuras sufrían fallos repentinos y en ocasiones catastróficos. Por ello era primordial el diseño ingenieril teniendo en cuenta la fractura.

Previamente a la revolución industrial, el material más empleado para la construcción era el ladrillo en elementos que debían soportar cargas a compresión, ya que este no se comporta bien a tracción. Con la sustitución de este material por el acero, se observaron roturas de carácter inesperado y repentino con valores tensión por debajo de la tensión límite de los materiales empleados en la construcción [2].



Figura 1. Fallo a fatiga de un eje de un automóvil

En 1944 aparecen documentos en los que se relata la incompreensión inicial del fenómeno, y como posible solución utilizan un coeficiente de seguridad mayor (en torno a 10) con el fin de evitar catástrofes.

Durante el siglo XIX se produjeron accidentes catastróficos en ámbitos navales, ferroviarios y aéreos.

Durante la segunda guerra mundial, en la industria naval americana surgió la necesidad de la fabricación de buques a gran velocidad. Estos buques eran los denominados buques Liberty en los que se optó como método de fabricación la soldadura en lugar de la tradicional construcción por roblonada. De los 4694 buques construidos durante la segunda guerra mundial, 1289 presentaron roturas importantes, 233 roturas frágiles graves y 12 de ellos se dividieron en 2 completamente.

Algunos de los barcos rompieron amarrados sin cargas apreciables debido fundamentalmente a la acción del frío. Posteriormente se establecieron medidas tales como especificaciones de composición química en los aceros o aprobaciones previas en el acero a utilizar en la construcción de buques mediante soldadura [2].

En lo referente a la industria ferroviaria, es destacable el accidente que tuvo lugar el 8 de Mayo de 1842 en la línea Paris Montparnasse-Versailles Rive Gauche cuando un tren procedente de Versailles descarriló a la salida del túnel de Meudon causando entre 50 y 200 muertes. Se pudo observar las marcas características de la fractura por fatiga en los ejes del convoy [4].

También cabe destacar en el ámbito aeronáutico en los años 50 dos aviones Comet de Havilland que fallaron de forma catastrófica a elevada altitud debido a la propagación de grietas muy pequeñas cercanas a las aberturas de las ventanas del fuselaje.

Los sectores de la industria más afectados por este tipo de rotura son los referentes al transporte, el sector energético, construcciones industriales y en gran medida el transporte de gases licuados a baja temperatura que ocasionan daños en los conductos.

Por todo lo ocurrido hasta entonces fue necesario el estudio del comportamiento de los materiales no solo bajo cargas estáticas, si no también bajo cargas variables, que a pesar de ser inferiores a las cargas de diseño producían efectos de fatiga que se debían evitar [2].

4 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura es la rama de la mecánica encargada del estudio de la estabilidad de los materiales, se centra en el conocimiento de los factores que generan fallo, como pueden ser diseños defectuosos, elecciones incorrectas de material, tratamientos de material erróneos, montajes incorrectos o condiciones de servicio diferentes a las de diseño.

La existencia y crecimiento de posibles grietas en el desempeño de las tareas iniciales de un componente es evidente, por ello se ha puesto de manifiesto el “diseño tolerante al daño”. Esta idea se basa en el control de las grietas hasta su evolución en críticas y en la retirada del servicio del componente. La herramienta de análisis es la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM).

Cuando están presentes grietas muy agudas, los factores elásticos de concentración de esfuerzos ya no son válidos, ya que no proporcionan un criterio útil para el diseño en esta situación.

4.1 Historia de la fractura

Se puede decir que las primeras investigaciones que se llevaron a cabo sobre por qué un material rompe antes a igualdad de cargas al aumentar el número de ciclos, fueron llevadas a cabo por William Jhon Macquorn Rankine trabajando con su padre en 1843. Su teoría trató de explicar la rotura repentina de ejes ferroviarios.

En 1850 y 1860 un ingeniero alemán llamado August Whöler se apoyó en los trabajos anteriores de Rankine y realizó los primeros ensayos para la industria del ferrocarril mediante la aplicación de cargas alternantes a probetas. August Whöler llegó a introducir el concepto de vida límite de fatiga del material y la curva S-N que relaciona la tensión alternante aplicada con el número de ciclos de vida del componente.

En 1903 Ewings y Humphries se dieron cuenta de que surgían líneas de deslizamiento para un valor de esfuerzo máximo muy por debajo del valor del límite de proporcionalidad, y que al aumentar el esfuerzo aumentaba el número de líneas de deslizamiento hasta terminar con la

rotura del material. Sin embargo como observó Whöler tampoco pudieron explicar la no rotura de las probetas bajo cierto valor de tensión.

En 1910, el norteamericano Bastin plantea la ecuación en forma logaritmo de tensión frente a logaritmo de número de ciclos para la zona de vida infinita de Whöler. Esos planteamientos son utilizados en la ecuación de hoy en día.

Hanson y Gough a mediados de los años 20 destacaron que para materiales férricos a bajos niveles de tensión de fatiga, se producía un endurecimiento del material que conseguía frenar la propagación de grietas.

Hoy en día tras grandes esfuerzos aún existen ciertas lagunas en la comprensión del comportamiento de los materiales a fatiga, sin embargo la teoría de deslizamiento parece ser la más eficaz. Gracias a los métodos tradicionales de cálculo y la teoría de fractura por fatiga, hoy en día podemos tener una base sólida para el diseño de estructuras metálicas [3].

4.2 Fractura cuasi-estática

En la fractura frágil la rotura se produce prácticamente de manera instantánea, la sección transversal simplemente se parte. Sin embargo las grietas se mueven lo suficientemente lento como para poder observarlas, este fenómeno no es instantáneo puesto que se necesita cierto tiempo para alimentar la energía de la grieta desde el campo de esfuerzo hasta la grieta para su propagación.

Se define la tenacidad a fractura R , como la energía para abrir una grieta por unidad de área, expresado en Kj/m^2 . En el método de la mecánica de la fractura, el factor de intensidad de esfuerzo K se conoce como tenacidad a fractura y se expresa como:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (4.1)$$

Donde:

a : es la longitud de la grieta [m]

σ : es el esfuerzo normal sobre el área total [MPa]

K : factor de intensidad de esfuerzo [$\text{MPa}\sqrt{m}$].

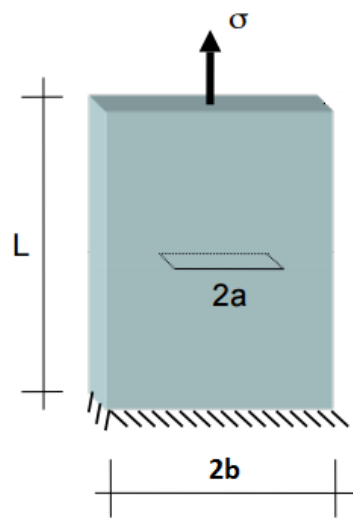


Figura 2. Placa de anchura $2b$ con grieta central y tensión longitudinal

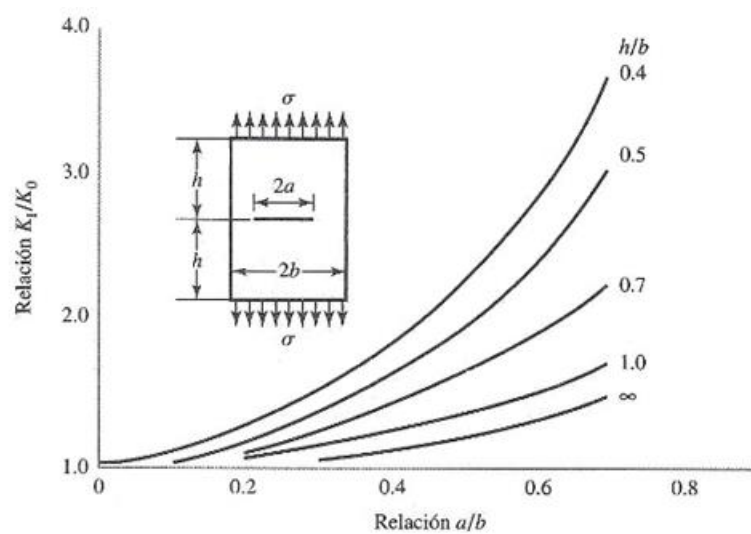


Figura 3. Gráfica de relación K_I/K_0 en función de las dimensiones de la placa y la grieta

La tenacidad a fractura R y K se relacionan con la siguiente ecuación:

$$K = \sqrt{E \cdot R} \quad (4.2)$$

Para una carga de tracción sobre una placa rígida, el factor de intensidad del esfuerzo K_1 caracteriza la magnitud del esfuerzo en la vecindad de una punta de grieta ideal aguda de un material linealmente elástico e isótropo.

Para un caso en el que $a/b=0$

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (4.3)$$

Sin embargo si $a/b \neq 0$ entonces:

$$K = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} = \frac{K_1}{K_0} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (4.4)$$

Donde β es un factor geométrico adimensional

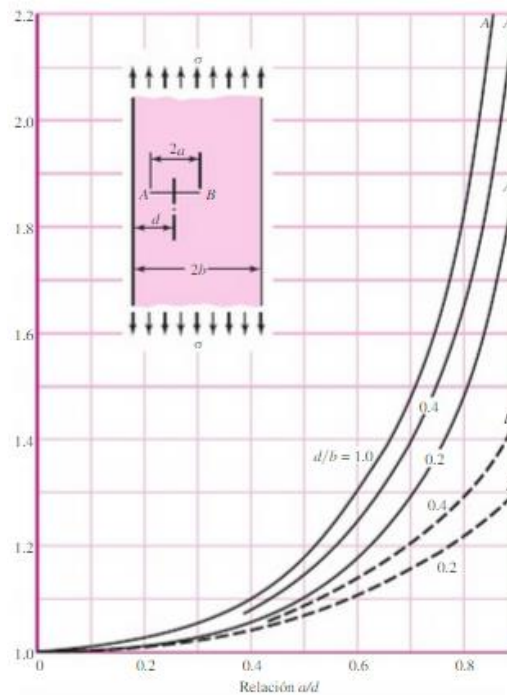


Figura 4. Placa con grieta transversal excéntrica

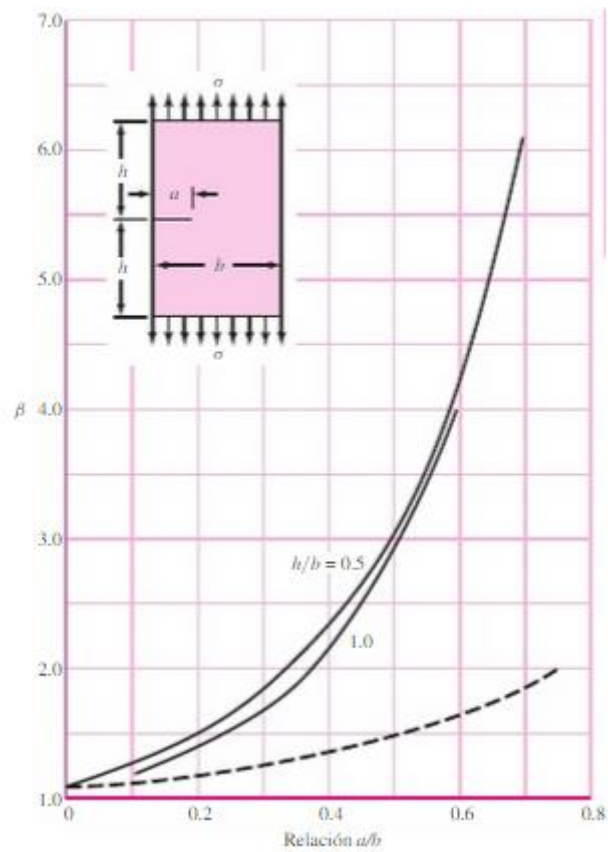


Figura 5. Placa con grieta en el borde

4.3 Tenacidad a la fractura

A través de ensayos controlados se mide el factor de intensidad del esfuerzo con el que se propagará una grieta hasta la fractura. El factor crítico de intensidad del esfuerzo lo llamamos K_c . De esta manera para una tensión y longitud de grieta conocidas, cuando la magnitud K_1 alcance la magnitud de K_c se producirá la fractura. La relación resistencia a esfuerzo K_c/K_1 se utiliza como un factor de seguridad:

$$n = \frac{S}{\sigma} = \frac{K_c}{K_1} \quad (4.5)$$

La tenacidad a fractura K_c para metales en ingeniería es de $20 \leq K_c \leq 200 \text{ MPa}\sqrt{m}$, para polímeros y cerámicas es de $1 \leq K_c \leq 5 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

Las tres formas de separar una placa se detallan en la siguiente figura. Los modos II y III representan modos de fractura por cortante, en el modo II los esfuerzos y deformaciones permanecen dentro del plano mientras que el modo III es cortante fuera del plano.

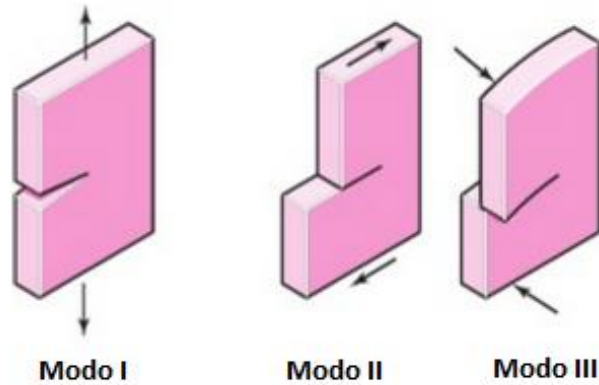


Figura 6. Modos de separar una placa

4.4 Agrietamiento por corrosión con esfuerzo ante carga estática

Los componentes sometidos a cargas estáticas en ciertos entornos corrosivos desarrollan con el paso del tiempo grietas de gran importancia. Algunos ejemplos de este fenómeno son resortes de relojes, arandelas de seguridad, cables marinos y otras partes sujetas a medios atmosféricos u otros ambientes corrosivos. El esfuerzo, el entorno, el tiempo y la estructura de la aleación influyen en el agrietamiento.

La curva siguiente muestra ensayos de esfuerzo-tiempo de probetas en un ambiente corrosivo.

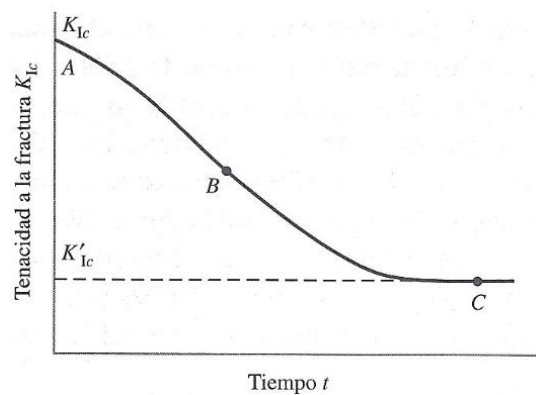


Figura 7. Cambio de tenacidad a la fractura con el tiempo

El valor límite del factor de intensidad del esfuerzo se denomina K_{Ic} correspondiente al punto C de la curva. Estos ensayos conllevan mucho tiempo para su determinación, algunos no menos de 1000h [1].

El conocimiento de las causas que han llevado a fallo el componente es una tarea complicada pero muy importante para determinar las posibilidades que ofrece cada material. Por ello vamos a clasificar los tipos de fallo según:

4.5 Tipo de carga

Según el tipo de carga o fuerza aplicada a nuestro material podemos distinguir entre carga estática y carga dinámica.

4.5.1 Carga estática

La fuerza o momento aplicado a un cuerpo posee una magnitud, dirección y punto de aplicación invariables a lo largo del tiempo. La carga puede ser tanto de tracción, compresión, cizalladura o torsión o cualquier combinación entre ellas. La temperatura y el tiempo de servicio de la pieza son aspectos a tener en cuenta.

4.5.2 Carga dinámica

La fuerza o momento aplicado a un cuerpo posee una magnitud, dirección y punto de aplicación variables a lo largo del tiempo. Este tipo de fractura es debida a cargas cíclicas que dan lugar a fatiga en el material. Con la combinación de temperatura y tiempo determinados se puede llegar a fluencia en el material. El fenómeno de fatiga en los materiales se explica detalladamente en el apartado 5.

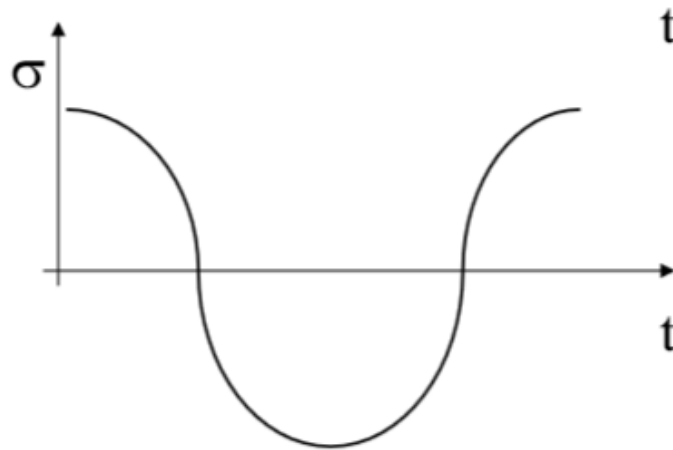


Figura 8. Tensión variable con el tiempo

4.6 Tipo de la fractura

Podemos clasificar la fractura a nivel atómico, microscópico o macroscópico.

4.6.1 Nivel atómico

A este nivel podemos utilizar la teoría de dislocaciones para explicar el comportamiento del material. Es importante en este apartado el conocimiento de la existencia de planos de deslizamiento (aquel plano con mayor densidad atómica). La deformación plástica es debida al deslizamiento de una parte del cristal sobre otra antes de alcanzar la fractura.

4.6.2 Nivel microscópico

La propagación de la grieta puede subdividirse a la vez en dos grupos, la fractura intergranular y transgranular. La fractura intergranular (también llamada intercrystalina) se produce debido a efectos de decohesión entre granos, es decir se produce a través de los bordes del grano y puede ir acompañada o no de cierta deformación granular. La fractura transgranular (también llamada transcristalina) se produce atravesando granos.

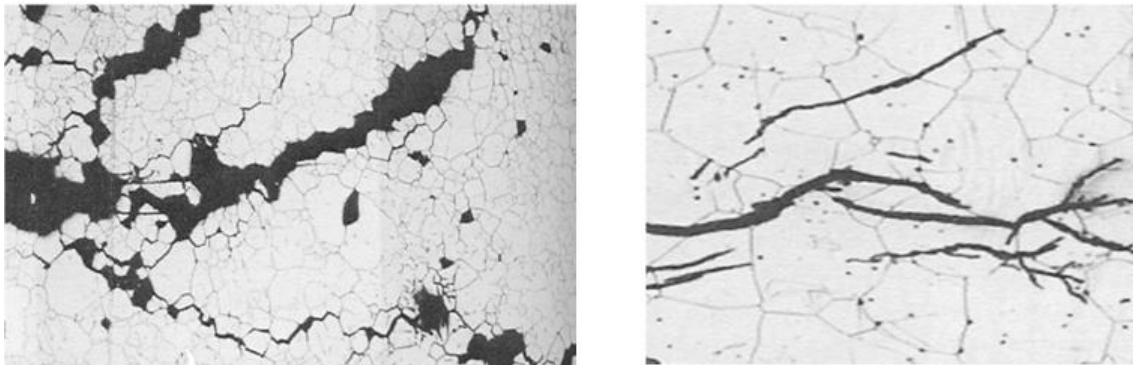


Figura 9. Fractura intergranular y transgranular

4.6.3 Nivel macroscópico

A nivel macroscópico podemos distinguir diferentes tipos de fracturas:

- Dúctil por carga estática: Hay una gran absorción de energía y un alargamiento producidos por una deformación plástica por deslizamiento.
- Frágil por carga estática: Apenas hay deformación plástica, pero cabe destacar un crecimiento de las grietas en dirección normal a la dirección de la carga aplicada.
- Frágil por carga estática mantenida: Distinguimos corrosión-tensión, fragilización por hidrógeno, por metal líquido y por irradiación neutrónica.
- Fatiga: Cuando solo se tiene en cuenta el efecto mecánico se dividen en alto y bajo número de ciclos, y cuando se combinan efectos mecánicos con la corrosión y la temperatura se dividen en fatiga-corrosión y fatiga-temperatura [3].

4.7 Mecanismos de fractura

Antes de comenzar con las diferentes teorías de la fractura, debemos diferenciar entre materiales dúctiles y frágiles.

Un material dúctil presenta una zona de deformación plástica previa a la rotura. En un elemento mecánico las deformaciones permanentes no son deseables, por ello, en este tipo de materiales la tensión máxima aplicable corresponde con el límite a fluencia (S_y).

Por el contrario un material frágil no presenta una zona de deformación permanente, por lo que la tensión máxima aplicable corresponde con el límite a rotura (S_u).

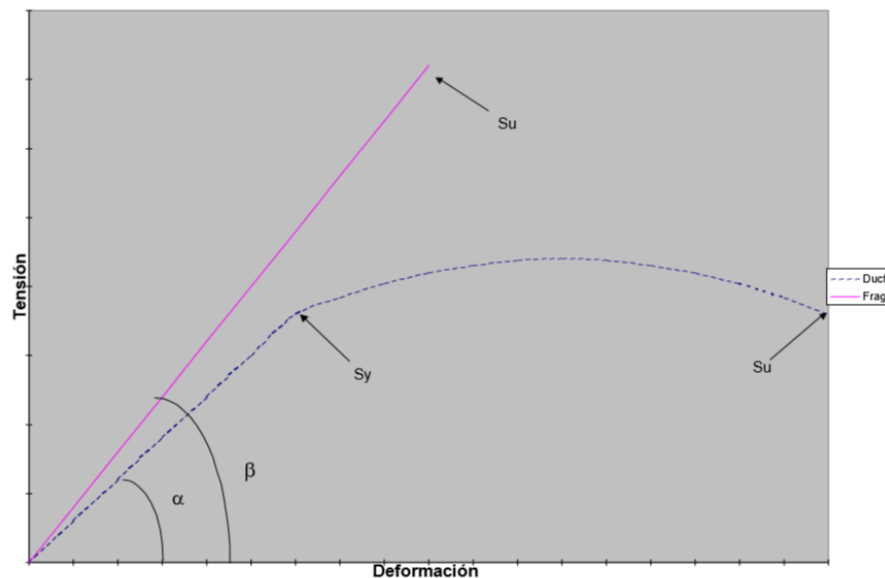


Figura 10. Material dúctil y frágil

En función de si nuestro material es dúctil o frágil, debemos tener en cuenta que en el diseño, los esfuerzos no deben superar la resistencia del material. Si nuestro material es dúctil el valor de resistencia que debemos utilizar es el de límite de fluencia (S_y) y si nuestro material es frágil debemos utilizar el límite de rotura (S_u).

En el diseño también debemos tener en cuenta que los materiales dúctiles se comportan de una manera parecida tanto en tracción como en compresión, sin embargo un material frágil posee un límite de tensión máxima mucho mayor trabajando a compresión que a tracción, a tracción es equivalente a tensión máxima a cortadura del material.

Vamos a diferenciar diferentes tipos de teorías de rotura en función de si el material es dúctil o frágil.

4.7.1 Teorías de rotura materiales dúctiles

4.7.1.1 Esfuerzo normal máximo (ENM)

Esta teoría se explica por su interés histórico, sin embargo no es útil ya que en ocasiones nos sitúa en el lado de la inseguridad. La teoría sostiene que la falla se produce cuando el esfuerzo principal mayor sea igual a la resistencia del material.

Dado un material al que se le aplican esfuerzos siguientes:

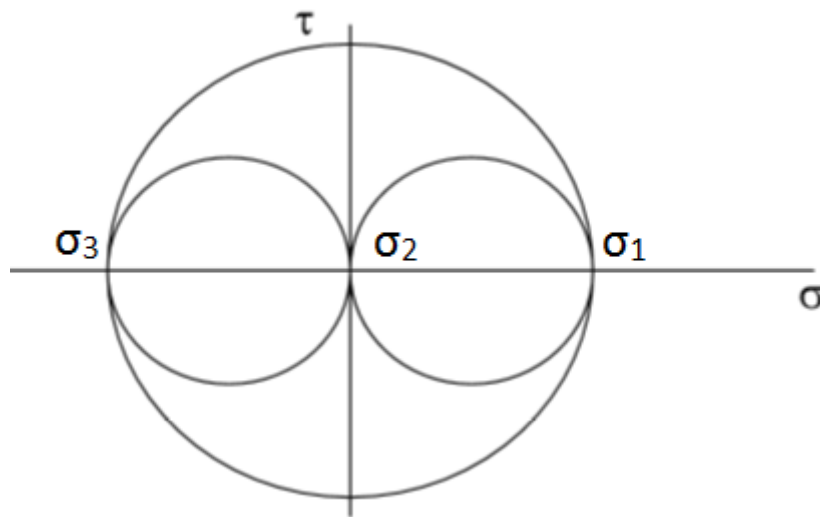


Figura 11. Tensiones normales y tangenciales

Sabiendo que las tensiones principales son:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

La falla se produce siempre que:

$\sigma_1 > S_{yt}$ debido a tracción ó $\sigma_3 < S_{yc}$ debido a compresión.

En caso de torsión pura sabemos que $\sigma_2 = 0$, y que $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max}$ entonces:

$$\tau_{\max} = S_y$$

Sin embargo de manera experimental se puede comprobar que el material produce deformación permanente cuando el esfuerzo cortante es de aproximadamente el 60% del valor del límite de resistencia a fluencia (S_y).

$$\tau_{\max} = 0.6S_y \text{ De manera experimental [6].}$$

4.7.1.2 Esfuerzo cortante máximo (ECM)

Debido a su facilidad analítica y a sus predicciones siempre en el lado de la seguridad es ampliamente utilizada. La teoría del esfuerzo cortante máximo estipula que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una probeta de ensayo a la tensión del mismo material cuando esta probeta comienza a fluir.

Para un ensayo de tracción simple tenemos:

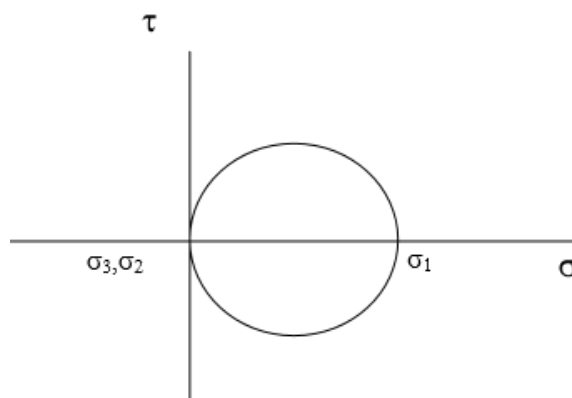


Figura 12. Círculo de Mohr para un ensayo de tracción simple

Como podemos observar en el círculo de Mohr la tensión máxima a cortadura corresponde con el radio del círculo:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1}{2} \quad (4.6)$$

Por tanto la falla se produce cuando:

$$\tau_{\max} = S_{sy} = \frac{S_y}{2} \quad (4.7)$$

$$S_{sy} = 0.5 \cdot S_y$$

4.7.1.3 *Energía de distorsión o de Von Mises-Hencky (TVM)*

La teoría de la energía de distorsión máxima predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total en un volumen unitario alcanza o excede la energía de deformación en el mismo volumen correspondiente a la resistencia de fluencia en tracción o en compresión.

La energía de deformación almacenada en un volumen unitario es:

$$U_s = \frac{S_y^2}{2E} \quad (4.8)$$

La energía de deformación almacenada en un volumen unitario sometido a esfuerzos combinados es:

$$U_\sigma = \frac{\varepsilon_1 \sigma_1}{2} + \frac{\varepsilon_2 \sigma_2}{2} + \frac{\varepsilon_3 \sigma_3}{2} = \frac{1}{2E} \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_3 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3)) = U_v + U_d \quad (4.9)$$

Siendo E el módulo de elasticidad, ν el coeficiente de poisson.

Sabiendo que la energía de deformación que se produce solo por el cambio de volumen es:

$$U_v = \frac{3 \cdot \sigma_{med}^2}{2 \cdot E} \cdot (1 - 2\nu) \quad (4.10)$$

Por tanto restando ambas ecuaciones obtendremos la energía de distorsión:

$$U_d = U_\sigma - U_v = \frac{1+\nu}{2E} \cdot \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right] \quad (4.11)$$

Para un ensayo de tracción simple tenemos que $\sigma_1 = \sigma'$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, por tanto:

$$U_d = \frac{1+\nu}{2E} \cdot \sigma'^2 \quad (4.12)$$

Igualando ambas expresiones se obtiene:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

Por tanto la fluencia ocurrirá cuando:

$$\sigma' \geq S_y$$

4.7.1.4 Teoría de la fricción interna

Se predice que la falla ocurre en un estado de esfuerzos multiaxiales cuando el círculo de Mohr mayor asociado con el estado de esfuerzos en el punto crítico se hace tangente o excede los límites de las envolventes de falla establecidos por condiciones de falla en ensayos de tracción simple, compresión y cortante usando probetas del mismo material y con la misma condición.

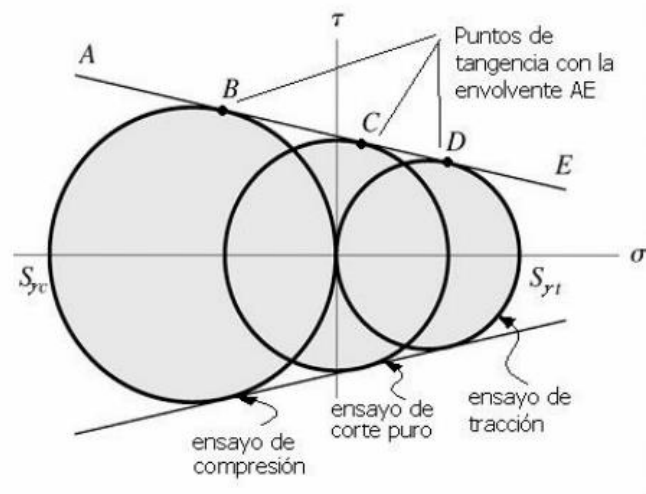


Figura 13. Círculos de compresión, tracción y cortante para definición de la falla por hipótesis de Mohr

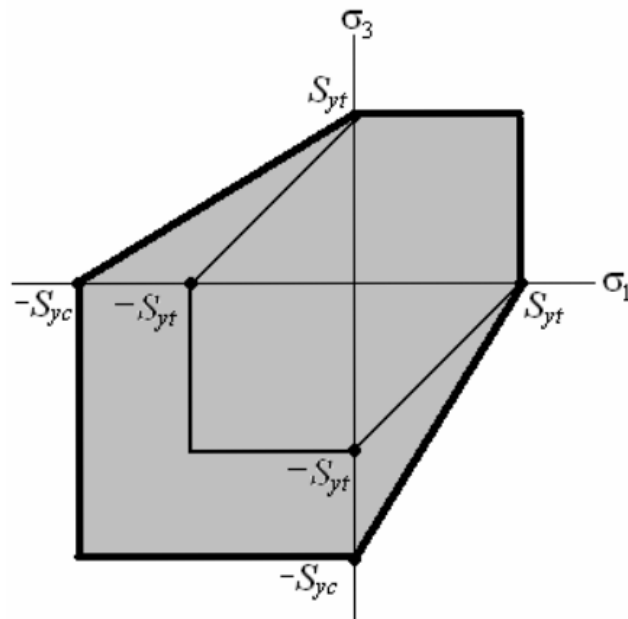


Figura 14. Hipótesis de falla de Coulomb-Mohr para esfuerzos triaxiales

Es decir, la fractura se produce cuando se establece un estado tensional tal que origina en los círculos de Mohr un círculo tangente a la envolvente de los dos círculos que representan el ensayo de tracción y de compresión.

Los dos estados y las resistencias se relacionan por medio de la ecuación 4.14.

$$\frac{\sigma_1}{S_t} - \frac{\sigma_3}{S_c} = 1 \quad \text{Con } \sigma_1 \geq 0 \text{ y } \sigma_3 \leq 0 \quad (4.14)$$

4.7.1.5 Comparación de las hipótesis para materiales dúctiles

Para realizar un análisis comparativo de los diferentes criterios, utilizaremos un diagrama de un estado biaxial con tensiones principales σ_A y σ_B . En el diagrama se puede observar la zona de seguridad y la zona de rotura fuera de la curva en el diagrama.

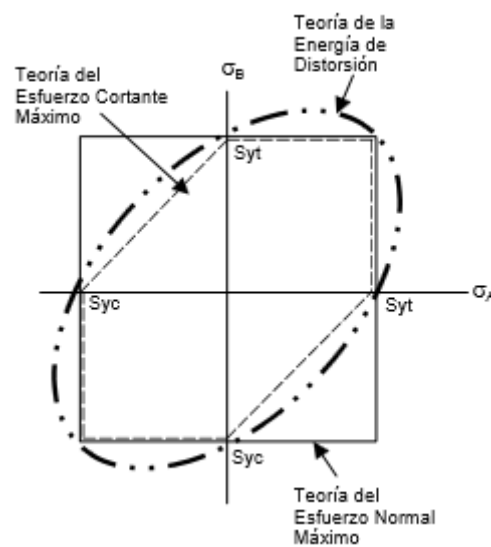


Figura 15. Comparación hipótesis de falla en materiales dúctiles

De manera experimental se ha comprobado que la teoría de energía de distorsión es la más precisa de las tres. La teoría del esfuerzo normal máximo no se utiliza ya que en ocasiones podríamos tener fluencia en el material y aún así esta teoría predice que nos situamos en el lado seguro. La teoría del esfuerzo cortante máximo es la más conservadora prediciendo fluencia en lugares en los que la teoría de Von Mises - Hencky predice posición segura. La teoría del esfuerzo cortante máximo es empleada cuando el coste ingenieril del desarrollo de la teoría de Von Mises no está justificado, podría ser una aproximación rápida. La teoría del esfuerzo normal máximo no debe emplearse nunca.

4.7.2 Teorías de rotura para materiales frágiles

4.7.2.1 Teoría del esfuerzo normal máximo (Rankine)

De igual modo que para materiales dúctiles postula que la falla ocurre cuando uno de los tres esfuerzos principales es igual o excede la resistencia. A diferencia de los materiales dúctiles que trabajábamos con resistencia a fluencia (S_y), para materiales frágiles trabajaremos con límite a rotura (S_u).

4.7.2.2 Teoría de Mohr modificada

Experimentalmente se demostró que la teoría de fricción interna o teoría de Coulomb-Mohr (TCM) era demasiado conservadora en el cuarto cuadrante. Tras varias modificaciones, la tensión máxima en la dirección principal 3 se define como:

$$S_3 = \frac{S_{uc}}{\frac{(S_{uc}-S_{ut}) \cdot \sigma_1}{S_{ut} \cdot \sigma_3} - 1} \quad (4.15)$$

Para materiales frágiles, esta teoría combinada con la teoría de Coulomb-Mohr es la mejor manera para predecir la rotura.

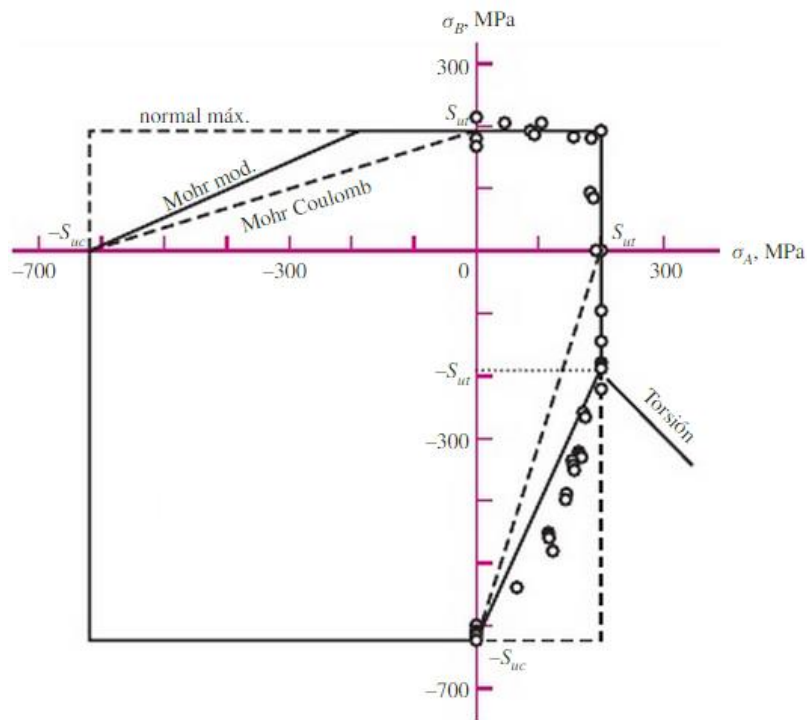


Figura 16. Comparación criterios de falla Coulomb-Mohr, Mohr modificada y esfuerzo normal máximo

5 Fatiga

Llamamos fatiga al fenómeno que se produce en partes mecánicas que están sometidas a la acción de cargas variables. Su característica principal es la rotura repentina, catastrófica y sin previo aviso del componente bajo cargas muy inferiores a la resistencia del material.

5.1 Características de rotura por fatiga

Es característico que la rotura por fatiga se produzca en un punto de concentración de tensiones como puede ser una grieta o fisura. Este tipo de rotura deja unas marcas características que aporta gran información acerca de la rotura del componente como podemos observar en la siguiente imagen:

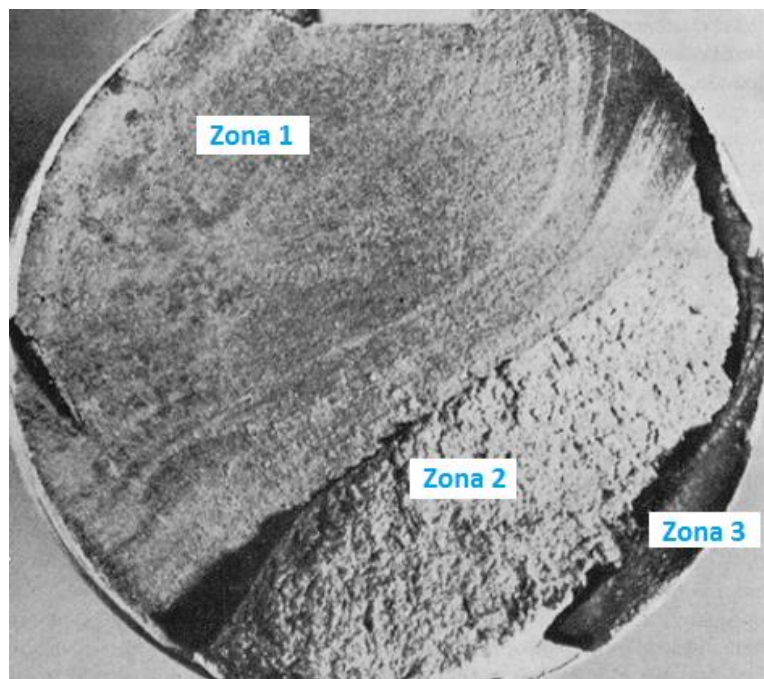


Figura 17. Marcas características de rotura por fatiga

A continuación vamos a describir que sucede en cada una de las partes:

- Zona 1: Es la zona que abarca mayor sección, corresponde con una primera propagación lenta de la grieta. Es característico su aspecto liso y se puede diferenciar la propagación de la grieta con cada una de las marcas. Estas marcas son de carácter asimétrico debido al giro rotativo de la pieza.
- Zona 2: Presenta un aspecto irregular y rugoso, corresponde con la etapa más rápida de propagación de la grieta.
- Zona 3: Finalmente es la zona donde se produce la rotura final, debido a la pequeña sección de material, desde el punto de vista estático es incapaz de hacer frente a la disposición de carga.

5.2 Crecimiento de la grieta

El desarrollo de la grieta pasa por tres estados: un estado de iniciación de la grieta, un estado de propagación y un estado final de grieta inestable.

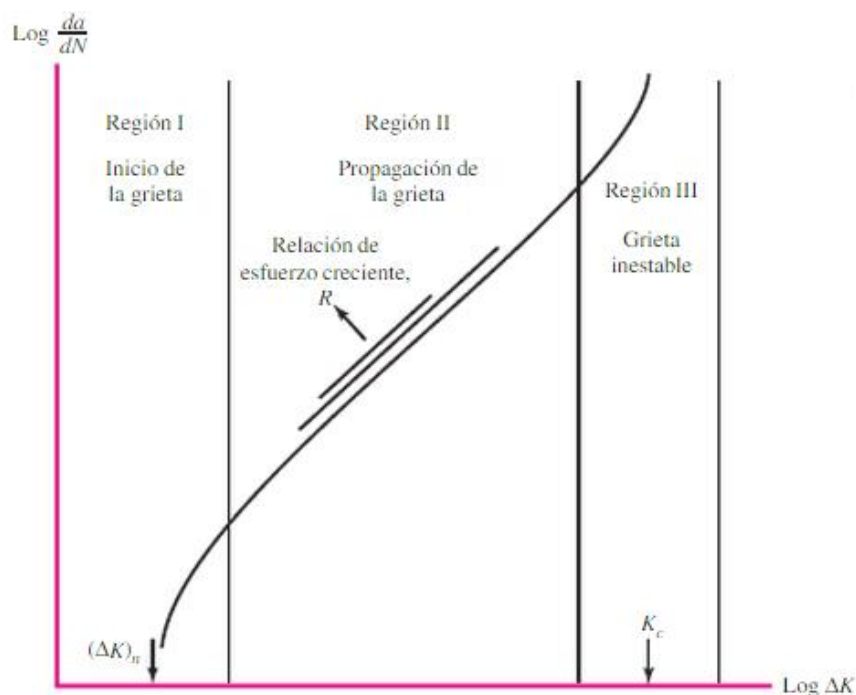


Figura 18. Regiones de evolución de una grieta.

A continuación vamos a detallar cada una de las tres regiones de crecimiento de la grieta:

- **Región I (Inicio de la grieta):** Una falla a fatiga comienza con una grieta pequeña, la grieta inicial es tan diminuta que no se puede detectar a simple vista y aún es muy difícil de localizar en una inspección mediante Magnaflux o Rayos X.

Cuando un grano situado en la superficie se deforma, se genera un escalón que se oxida de manera instantánea. Debido a la oxidación, la deformación en sentido contrario se hace imposible en ese plano, por lo que se ha de formar otro escalón en otro plano que se oxidará y se suprimirá la deformación en este nuevo plano.

Repitiendo numerosas ocasiones este ciclo se acaban por formar protuberancias o entrantes en la superficie original creando concentraciones de tensiones. Aparece una microgrieta que se propaga a lo largo de las bandas persistentes de deslizamiento formando 45° con la dirección de la tracción. En un primer momento la grieta tiene mucha dificultad para propagarse, pero con incrementos en la carga o número de ciclos, esta se propaga a granos adjuntos.

- **Región II (Propagación de la grieta):** La grieta se desarrollará en un punto de discontinuidad del material como un cambio de sección o un agujero o incluso marcas de inspección o identificación.

A partir de este momento la propagación de la grieta se hace estable y sigue una ley potencial de acuerdo con la ley empírica que propusieron Paris y Erdogan en 1960:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m \quad (5.1)$$

Donde:

a: es el tamaño de la fisura

N: es el número de ciclos

C y m: son constantes que dependen del material y medio

ΔK_I : es el rango de intensidad de tensiones

$$\Delta K_I = K_{max} - K_{min} \quad (5.2)$$

K_{max} y K_{min} son los valores respectivos del valor de intensidad de tensiones para un ciclo.

- **Región III (Grieta inestable):** A medida que el área sometida a esfuerzo disminuye de tamaño, la magnitud del esfuerzo se incrementa hasta que al fin el área restante falla de manera repentina.

En esta etapa se produce la rotura catastrófica por clivaje o por coalescencia de microcavidades.

5.3 Relación vida-esfuerzo

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las probetas se someten a fuerzas repetidas o variables de magnitudes determinadas, a la vez que se cuentan los ciclos de su esfuerzo hasta la falla. El dispositivo de ensayo que se emplea con más frecuencia es la máquina de viga rotatoria de R.R. Moore.

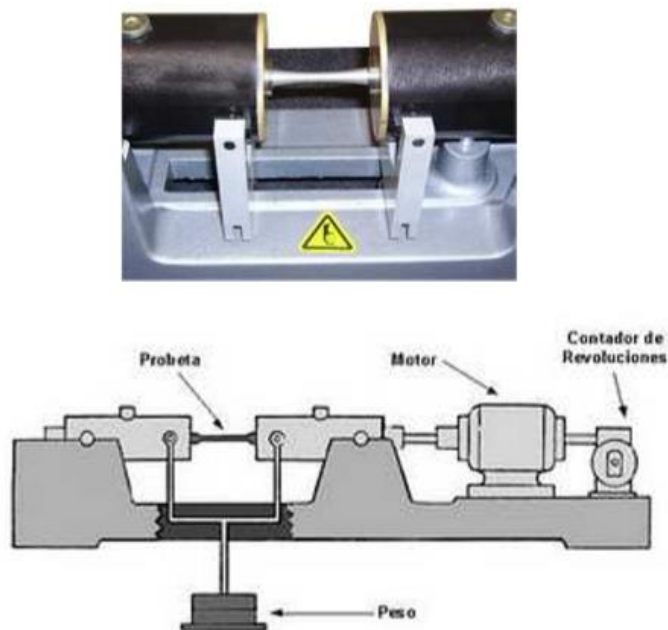


Figura 19. Ensayo viga rotatoria

Para establecer la resistencia a la fatiga de un material se necesita un número muy elevado de ensayos debido al carácter estadístico de la fatiga. En este ensayo se somete la probeta a una carga constante de flexión y se registra el número de revoluciones de la viga para que se suceda la falla. El primer ensayo se realiza con una tensión poco menor que la resistencia última del material, el segundo con un esfuerzo menor que el primero. De esta manera se grafica un diagrama S-N (Stress-Number of cycles) como el siguiente:

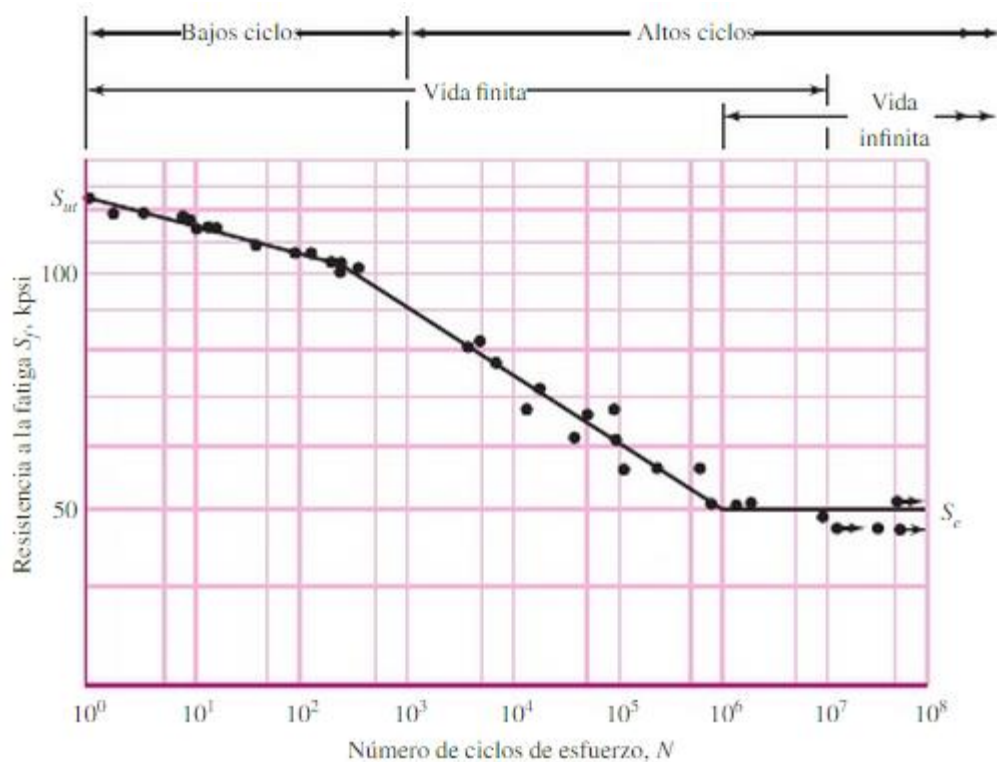


Figura 20. Diagrama S-N

En la gráfica podemos diferenciar tres zonas:

- **Ciclo bajo ($1-10^3$ ciclos):** Esta zona se caracteriza por una reducción muy leve del valor de la tensión para rotura. El material se comporta de una manera muy similar a como lo hace bajo cargas estáticas pero con una leve reducción de la resistencia (un 10% aproximadamente).
- **Ciclo alto (10^3-10^6 ciclos):** Muestra una reducción mucho más brusca de la duración y un comportamiento muy diferente que bajo cargas estáticas.

- **Vida infinita (10^6 - 10^7):** Se presenta un cambio brusco en la dirección de la gráfica, y el valor de resistencia para este cambio se denomina límite de resistencia a la fatiga S_e , límite de fatiga o límite de fatiga sin corregir S'_e .

En el caso de los aceros la gráfica se hace horizontal, pero no se hace horizontal nunca para metales no ferrosos y aleaciones; por ello no poseen un límite de fatiga.

5.4 Límite de resistencia a la fatiga

Hoy en día la determinación de los límites a fatiga de materiales es una rutina que se lleva a cabo con ensayos de esfuerzo. Para diferentes tipos de materiales podemos obtener una gráfica como la siguiente:

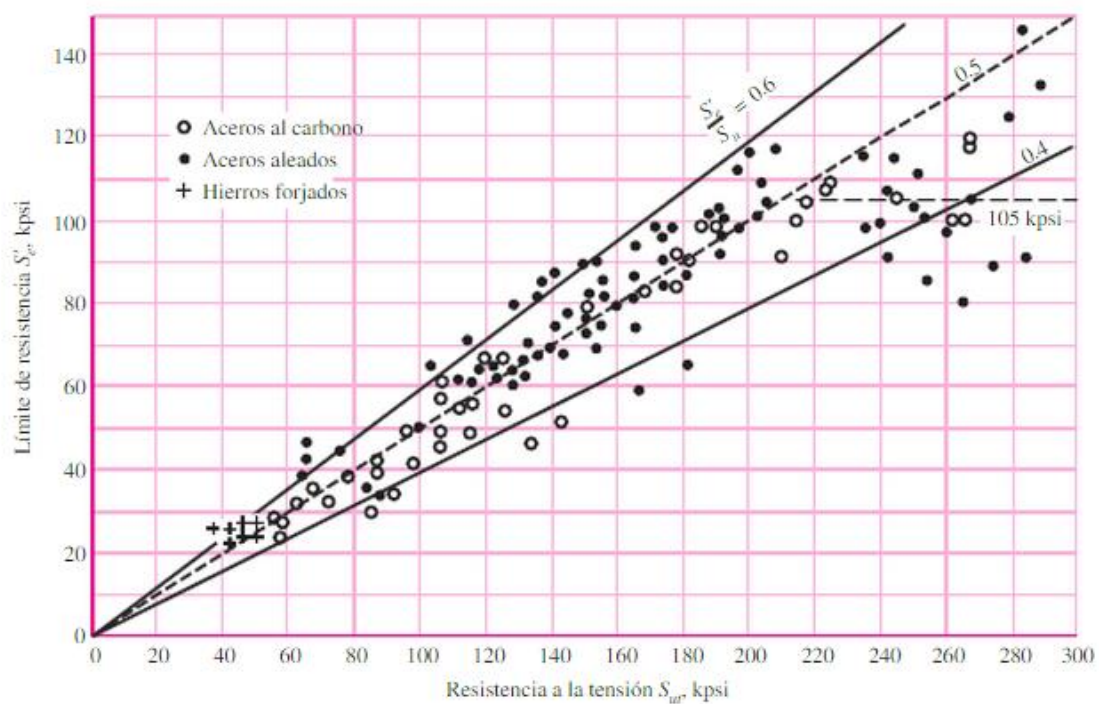


Figura 21. . Límite de resistencia a la fatiga S'_e frente a resistencia a la tensión S_{ut} para varios materiales

En la gráfica podemos observar como el límite a fatiga varía entre el 40% y el 60% de resistencia a la tensión para aceros, y hasta casi 200Kpsi (1400MPa). A partir de 1400MPa, la dispersión parece incrementarse, pero tiende a nivelarse en la línea horizontal discontinua de

100Kpsi (700MPa). En la siguiente tabla se recogen diferentes límites a fatiga para distintos materiales:

Tabla 1. Relación S_e/S_{ut} para varias clases de materiales

Clase de material	$\frac{S_e'}{S_{ut}}$
Acero forjado	0.50
Acero fundido	0.40
Partículas de acero	0.38
Fundición gris	0.35
Fundición maleable	0.40
Fundición modular normalizada	0.33

$$\text{Aceros forjados} = \begin{cases} S_e' = 0.50S_{ut}, & S_{ut} \leq 1400MPa \\ S_e' = 700MPa, & S_{ut} > 1400MPa \end{cases}$$

$$\text{Aceros colados} = \begin{cases} S_e' = 0.45S_{ut}, & S_{ut} \leq 600MPa \\ S_e' = 275MPa, & S_{ut} > 600MPa \end{cases}$$

5.5 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Existen diferencias entre los ensayos obtenidos en laboratorio y las condiciones reales de funcionamiento, por ello los límites a fatiga no valdrán lo mismo. Algunas de estas diferencias son el material (composición, base de falla, variabilidad), manufactura (tratamiento térmico, método, condición superficial...), entorno (corrosión, temperatura, tiempo de relajación...) y diseño (forma, vida, velocidad, ludimiento...).

Marin identificó algunos de estos factores y permitió ajustar el límite a fatiga de un material por medio de una serie de correcciones de la siguiente manera:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S_e' \quad (5.3)$$

Siendo:

- K_a : factor de modificación de la condición superficial.
- K_b : factor de modificación de tamaño.
- K_c : factor de confiabilidad.
- K_d : factor de modificación de la temperatura.
- K_e : factor de modificación de efectos varios.
- S_e : límite de resistencia a la fatiga corregido. [MPa].
- S_e' : límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria. [MPa].

A través de estas correcciones podemos calcular el límite de resistencia a la fatiga corregido S_e .

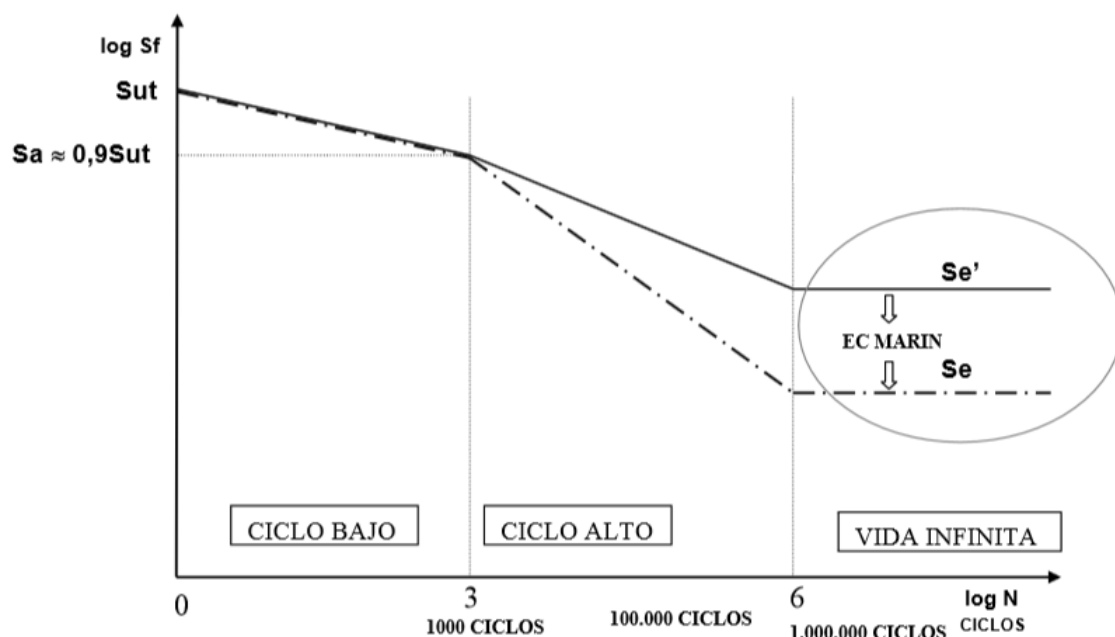


Figura 22. Desplazamiento de la gráfica a través de la ecuación de Marin

5.5.1 Factor de superficie (K_a)

La superficie de una probeta de viga rotativa está muy pulida, y además se le da un pulido final en la dirección axial con el fin de eliminar cualquier ralladura circunferencial. La reducción del límite de fatiga debido al acabado superficial es debido a una mayor rugosidad en la superficie que favorece una acumulación de tensiones.

El valor de K_a se obtiene de la siguiente ecuación:

$$K_a = a \cdot \bar{S}_{ut}^b \cdot \ln(1, C) \quad (5.4)$$

Estando a, b y c recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 2. Factor de superficie K_a

Acabado superficial	a [Kpsi]	a [MPa]	b	c
Esmerilado	1.34	1.58	-0.086	0.120
Laminado en frío	2.67	4.45	-0.265	0.058
Laminado en caliente	14.5	56.1	-0.719	0.110
Salido de forja	39.8	271	-0.995	0.145

5.5.2 Factor de tamaño (K_b)

Las dimensiones de nuestro elemento en condiciones reales de funcionamiento puede tener unas medidas muy diferentes a las de la probeta de ensayo, incluso no ser cilíndrica. Por norma general a mayor diámetro menor límite a fatiga.

- Probeta **circular con carga axial**:

$$K_b=1$$

- Probeta **circular con flexión y torsión**:

$$\text{Factor de tamaño} = \begin{cases} K_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}, & 2.79 \leq d \leq 51mm \\ K_b = 1.189 \cdot d^{-0.097}, & 52 \leq d \leq 250mm \end{cases}$$

- Probeta de sección **no circular**:

Para llevar a cabo el método se analizará una dimensión efectiva d_e obtenida al igual el volumen de material sometido a esfuerzo igual o superior al 95% del esfuerzo máximo con el mismo volumen en la probeta giratoria. Para una sección redonda, rotativa, el

área de 95% de esfuerzo es la de un anillo con un diámetro exterior d y un diámetro interior $0.95d$. Por tanto el área se obtiene:

$$A_{0.95\sigma} = \frac{\pi}{4} (d^2 - (0.95d)^2) = 0.0766d^2$$

La ecuación también resulta válida para una sección redonda hueca giratoria, en el caso de vigas redondas sólidas o huecas no rotativas, el área de 95% de esfuerzo significa el doble del área fuera de las dos cuerdas paralelas que tienen un espaciamiento de $0.95D$. Haciendo el cálculo exacto:

$$A_{0.95\sigma} = 0.0105D^2$$

Si igualamos las dos ecuaciones obtenemos el diámetro efectivo para viga redonda o hueca rotativa:

$$d_e = 0.370D$$

Si queremos calcular el diámetro efectivo para una sección rectangular $h \times b$:

$$A_{0.95\sigma} = 0.05h \cdot b$$

$$d_e = 0.808(h \cdot b)^{\frac{1}{2}}$$

5.5.3 Factor de confiabilidad (K_c)

Debido al carácter probabilístico de los ensayos a fatiga de componentes, existe un factor modificativo de la confiabilidad, que permite cuantificar la probabilidad de fallo.

Los diferentes valores de K_c para diferentes valores de confiabilidad se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Factor de confiabilidad K_c

Confiabilidad	Factor de confiabilidad K_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620
0.9999999	0.584
0.99999999	0.551
0.999999999	0.520

5.5.4 Factor de temperatura (K_d)

Cuando las temperaturas de operación son menores que la temperatura ambiente entonces, tal vez, reúna la fractura frágil; sin embargo si las temperaturas de operación son mayores que la temperatura ambiente, se debe investigar la fluencia primero, ya que la resistencia a fluencia disminuye con rapidez con la temperatura. Cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico en un material que opera a temperaturas elevadas. Debido a la resistencia a la fatiga reducida, el proceso de falla depende hasta cierto punto, del tiempo.

Obtener el factor K_d resulta una tarea complicada, por ello es recomendable la realización de pruebas de laboratorio para su obtención. Los distintos valores que puede tomar K_d lo resumimos en los siguientes:

$$\text{Factor de temperatura} = \begin{cases} K_d = 1, & T \leq 450 \text{ } ^\circ\text{C} \\ K_d = 1 - 5.8 \cdot 10^{-3}(T - 450), & 450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 550 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

5.5.5 Factor de modificación de efectos varios (K_e)

A pesar de que el factor K_e tiene como objetivo la reducción del límite de resistencia a la fatiga, en realidad es un recordatorio para tener en cuenta diversos efectos para los cuales K_e no siempre está disponible. Destacamos algunos efectos diversos como los siguientes:

Esfuerzos residuales

Pueden mejorar el límite de resistencia a la fatiga o afectarlo de manera negativa. Si el esfuerzo residual en la superficie es de compresión el límite de resistencia a la fatiga mejora. Las fallas por fatiga suelen ser debidas a esfuerzos de tracción. Operaciones como granallado, martillado o laminado en frío acumulan esfuerzos de compresión en la superficie y mejoran mucho el límite de resistencia a la fatiga.

Características direccionales de la operación

Partes laminadas o estiradas tienen un límite de resistencia a la fatiga en la dirección transversal que puede ser de 10% a 20% menor que el límite de resistencia a la fatiga en dirección longitudinal.

Endurecimiento superficial

Algunas partes con endurecimiento superficial fallan en la superficie o en el radio máximo del núcleo, dependiendo del gradiente de esfuerzos. En la figura podemos apreciar la distribución de un esfuerzo triangular de una barra sometida a tracción o torsión.

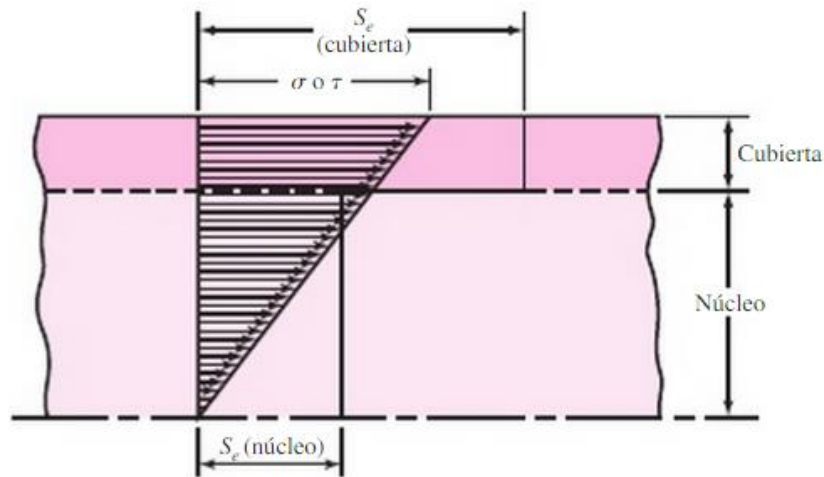


Figura 23. Falla debida a endurecimiento superficial

Corrosión

Las partes que operen en una atmósfera corrosiva tienen una menor resistencia a la fatiga, debido al desbastado o picadura de la superficie del material causado por el material corrosivo. La corrosión y el esfuerzo sobre la probeta ocurren al mismo tiempo, por ello cualquier probeta fallará cuando se someta a esfuerzos diversos bajo un ambiente corrosivo, es decir, no existe límite de fatiga.

Recubrimiento electrolítico

Los recubrimientos metálicos como los hechos con níquel, cromo o cadmio reducen el límite de resistencia a la fatiga hasta en un 50%. El galvanizado no afecta a la resistencia a la fatiga y la oxidación anódica reduce el límite de resistencia a la fatiga hasta un 39%, pero no tiene efecto en fatiga bajo acción de torsor [1].

Metalizado por aspersión

Provoca imperfecciones superficiales que pueden ocasionar grietas, se puede llegar a reducir hasta en un 14% el límite de resistencia a la fatiga del material [1].

Frecuencia cíclica

Bajo condiciones normales la falla por fatiga es independiente de la frecuencia, sin embargo, unido a los efectos de temperatura y/o corrosión la frecuencia cíclica resulta importante. A menor frecuencia y mayor temperatura mayor será la capacidad de propagación de las grietas y como consecuencia menor será la vida [1].

Corrosión por frotamiento

Se debe por el movimiento microscópico de partes o estructuras de ajuste a presión. El proceso implica decoloración superficial, picaduras, y a la larga fatiga. El factor de frotamiento varía entre 0.29 y 0.90 [1].

5.5.6 Factor de concentración de tensiones (K_f)

Debido a que un gran número de elementos posee ranuras, chaveteros o muescas es necesario considerar la reducción del límite de fatiga que implica. Para determinar el factor K_f seguiremos los siguientes pasos:

1. Calculo el factor de concentraciones teórico debido a la geometría de la pieza con ayuda de las gráficas adjuntas en el Anexo A:

2. En función del tipo de material y la naturaleza de las cargas a las que esté sometido el elemento mecánico podemos obtener el factor de sensibilidad a las ranuras q con ayuda de las siguientes gráficas:

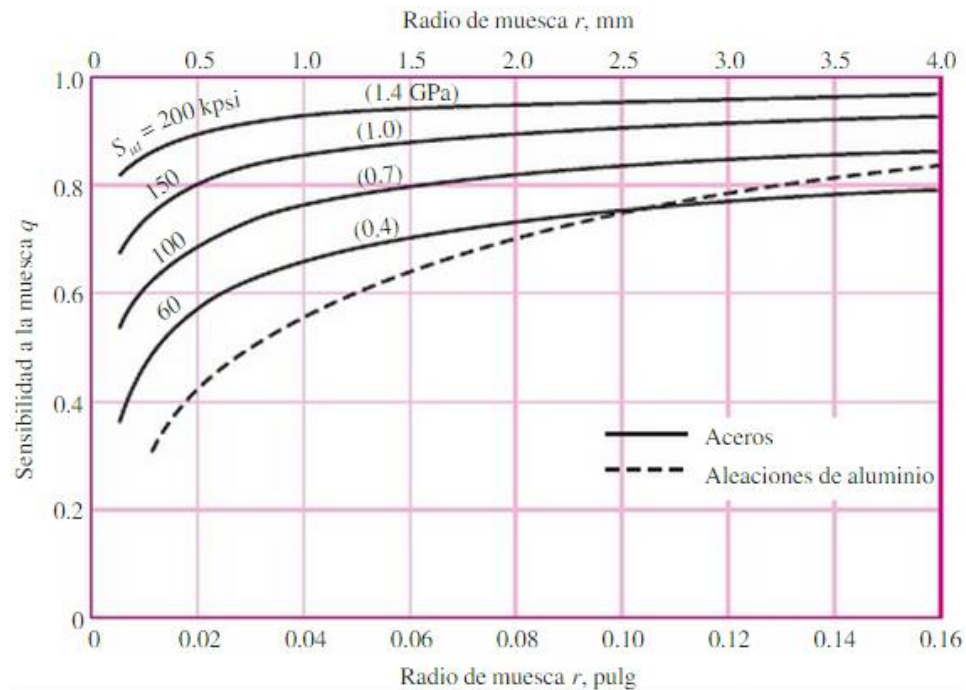


Figura 24. Sensibilidad a las ranuras para cargas de flexión y tensión alternantes

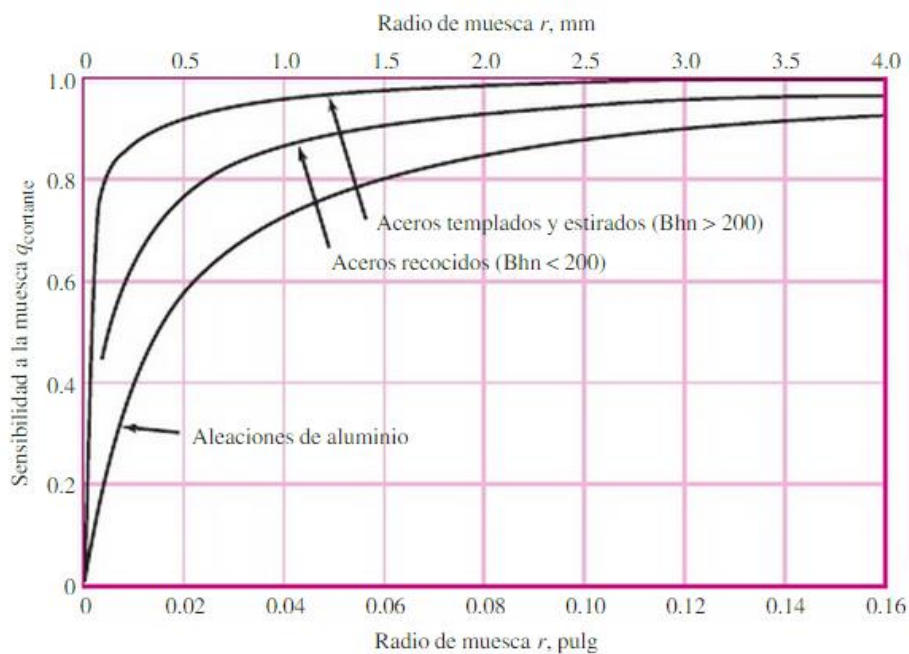


Figura 25. Sensibilidad a las ranuras para cargas de torsión alternantes

3. Obtenemos el valor del factor de reducción de resistencia a la fatiga R_f a través de la siguiente ecuación:

$$R_f = q \cdot (K_t - 1) + 1 \quad (5.5)$$

4. Por último obtenemos el factor de concentración de tensiones K_f como la inversa de R_f

$$K_f = \frac{1}{R_f} \quad (5.6)$$

5.6 Caracterización de esfuerzos fluctuantes

Los esfuerzos fluctuantes presentan forma sinusoidal u otros patrones, sin embargo, lo que si se ha determinado es que en los patrones periódicos se encuentra un solo máximo y un solo mínimo de la fuerza. De esta manera $F_{m\acute{a}x}$ y $F_{m\acute{i}n}$ se emplean para caracterizar el patrón de la fuerza. Podemos caracterizar la componente de intervalo medio de fuerza F_m como:

$$F_m = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (5.7)$$

$$F_a = \left| \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (5.8)$$

Donde:

F_m : Componente de intervalo medio de fuerza.

F_a : Componente de la amplitud de la fuerza.

En la figura 27 podemos distinguir diferentes tipos de relaciones esfuerzo-tiempo:

- a) Esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia.
- b) Y c) Esfuerzo fluctuante no senoidal.
- d) Esfuerzo fluctuante senoidal
- e) Esfuerzo repetido.
- f) Esfuerzo senoidal completamente invertido.

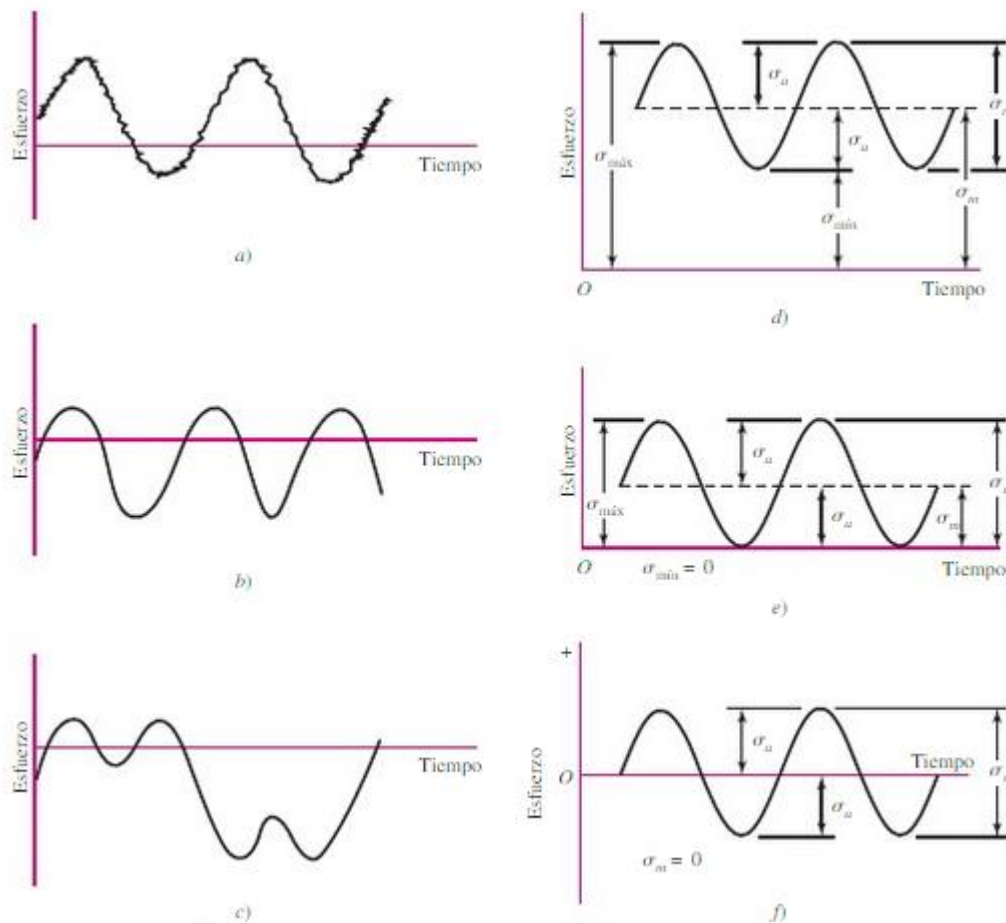


Figura 26. Relaciones esfuerzo-tiempo

Donde:

σ_{\max} : esfuerzo máximo.

σ_{\min} : esfuerzo mínimo.

σ_a : componente de la amplitud.

σ_m : componente de esfuerzo medio.

σ_r : intervalo de esfuerzo.

σ_s : esfuerzo estático o constante.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (5.9)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (5.10)$$

5.7 Componentes variables de esfuerzo medio y amplitud

Hasta ahora teníamos un esfuerzo medio nulo y una amplitud igual al esfuerzo máximo, a partir de ahora con las componentes variables de esfuerzo medio y amplitud, el problema se tratará buscando una relación entre componente alternante de tensión y la duración del elemento, sabiendo que la tensión media disminuirá los valores de resistencia.

Para poder analizar la vida de un componente, en ocasiones solo disponemos del ensayo de viga rotativa, sin embargo con tensión media no nula $\sigma_m \neq 0$ se debe calcular por medio de relaciones empíricas que determinan el fallo.

Vamos a estudiar el enfoque de Goodman, el de Soderberg y el de Gerber.

5.7.1 Criterio de Goodman

En el criterio de Goodman, el lugar geométrico de la falla es una línea recta de álgebra lineal y fácil, se grafica fácilmente para cada problema. Según el criterio la variación de la resistencia alternante con la tensión media se describe mediante una recta que pasa por los puntos $(0, S_e)$ y $(S_{ut}, 0)$. Es decir el valor del esfuerzo alternante para N ciclos a rotura es S_e , y el valor para carga alternante nula del esfuerzo medio para que se produzca fallo es S_{ut} .

De esta manera la rotura para N número de ciclos se produce cuando:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (5.11)$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_e : Límite de fatiga corregido

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)

S_{ut} : Resistencia a rotura en tracción.

5.7.2 Criterio de Soderberg

Esta teoría también es lineal y postula que el valor de esfuerzo alternante para ausencia de tensión media es S_e y el valor de esfuerzo medio para ausencia de esfuerzo alternante (carga estática) y si el material es dúctil es de S_{yt} . Esta teoría es la más conservadora de las tres.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1 \quad (5.12)$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_e : Límite de fatiga corregido

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)

S_{yt} : Resistencia a fluencia en tracción (debido al carácter dúctil del material)

5.7.3 Criterio de Gerber

Esta teoría sostiene que la variación entre esfuerzo alternante y esfuerzo medio tienen una variación en forma de parábola según la ecuación:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (5.13)$$

Donde:

S_a : Resistencia alternante (debida al valor de amplitud de tensión)

S_e : Límite de fatiga corregido

S_m : Resistencia media (debida al valor de tensión media)

S_{ut} : Resistencia a rotura en tracción.

En la siguiente imagen podemos observar las diferencias existentes entre las tres teorías mencionadas anteriormente.

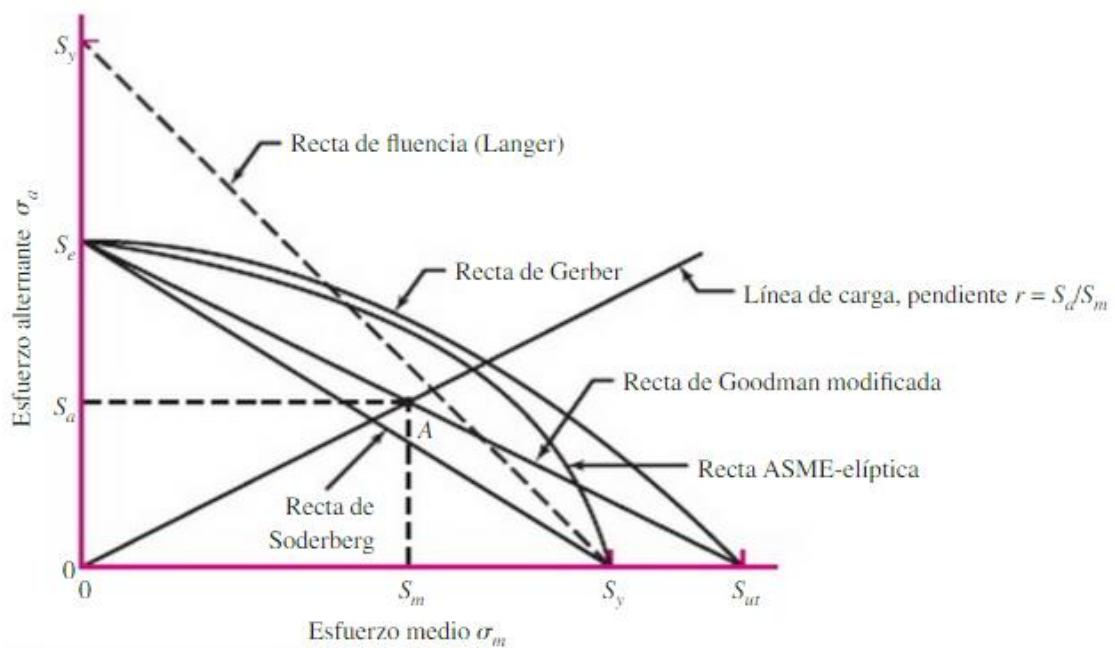


Figura 27. Criterios de falla en carga variable

Para cualquier punto situado por debajo de las líneas, previene contra el fallo. Si un punto está sobre la línea, se espera fallo en esa duración y si está por encima de la línea, el fallo se producirá a menor número de ciclos.

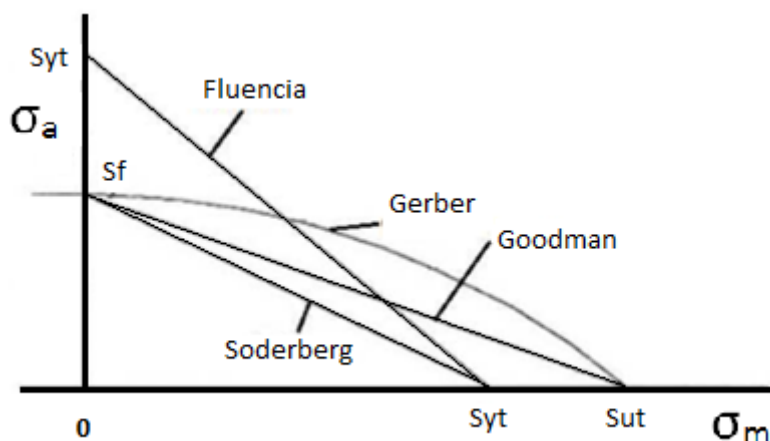


Figura 28. Criterios de Goodman, Soderberg, Gerber y línea de fluencia

Como podemos observar en la figura 29, el criterio de Soderberg es el único que previene contra fluencia, es decir asegura que la tensión máxima no superará el valor de resistencia a la fluencia del material. Según el criterio de Gerber y de Goodman el material puede haber roto también por fluencia y no por fatiga.

5.7.4 Línea de carga

La línea de carga es la representación en un diagrama σ_m - σ_a de los posibles estados de tensión de un estado cuando la carga experimenta variaciones físicamente posibles.

En algunos sistemas mecánicos, la variación de la tensión alternante solo puede ir representada en función de la variación tensional media.

Por ejemplo, el diente de un engranaje en su zona de engrane está sometido a un esfuerzo de flexión, sin embargo en la zona de no engrane el diente no está sometido a ningún esfuerzo. Al aumentar la tensión, aumenta la tensión alternante pero a la vez aumenta también la tensión media en la misma medida. Este valor será igual a la mitad del valor del esfuerzo.

En la figura 30 podemos ver la línea de carga representada en el diagrama de Goodman.

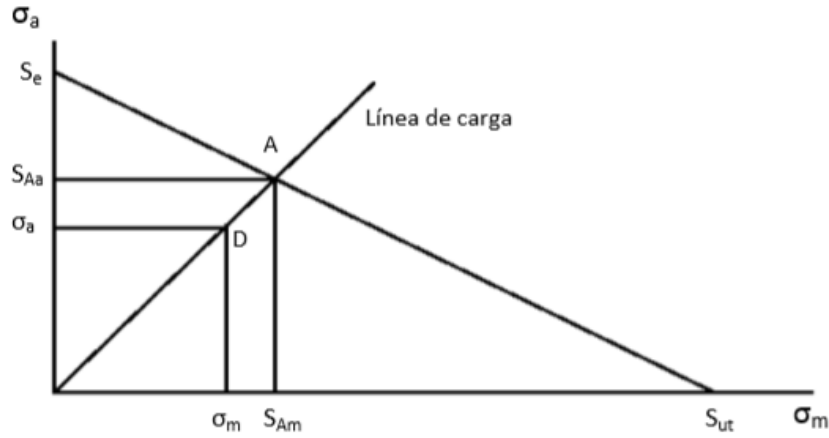


Figura 29. Línea de carga en el diagrama de Goodman

El punto A corresponde al fallo para vida infinita.

En lo referido al factor de seguridad, deberíamos encontrar un número que al multiplicarlo por la carga (y como consecuencia a la tensión media y alternante) nos situase en el punto A.

Dada la expresión de Goodman:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

Multiplicamos por un valor n la tensión alternante y media.

$$\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e} + \frac{n \cdot \sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

Despejando el valor de n:

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (5.14)$$

6 Ensayos no destructivos (END)

Llamamos ensayos no destructivos a un conjunto de técnicas que nos permiten obtener información del material acerca de su calidad en la estructura o microestructura, sin alterar las propiedades ni modificar su utilidad en un futuro. Con este tipo de ensayos podemos detectar defectos físicos como grietas, inclusiones, porosidad o también errores dimensionales.

Este tipo de ensayos resulta muy útil ya que se lleva directamente a cabo sobre piezas ya fabricadas en funcionamiento y se pueden realizar varios ensayos sobre la misma pieza debido a su carácter no destructivo. Sin embargo este análisis debe ser llevado a cabo por personas cualificadas que interpreten los resultados de manera correcta ya que en muchos casos las propiedades son analizadas cualitativamente.

Dependiendo de las características de nuestro material podemos realizar ensayos como: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes parásitas, radiografías, ultrasonidos o emisiones acústicas.

6.1 Inspección visual

Es la inspección más sencilla, en muchos casos previo a otras técnicas de ensayo. Se basa en la observación de la totalidad de la superficie con el fin de detectar defectos superficiales y discontinuidades con la ayuda de elementos ópticos como lupas o pantallas de ordenador.

Podemos detectar soldaduras y uniones defectuosas, mal acabado superficial, cavidades, grietas...

6.2 Líquidos penetrantes

Este método está basado en la posible penetración de un líquido aplicado sobre la superficie de la pieza, con la intención de que se muestren las discontinuidades que posea, debido al carácter capilar, de forma que, al limpiar la superficie del exceso de líquido, únicamente quede aquel que haya penetrado en las discontinuidades. Una vez que ha transcurrido el tiempo

suficiente para que penetre el líquido en los defectos, el líquido en exceso se elimina con otro denominado eliminador. Finalmente se aplica un agente revelador para que aflore el líquido en la superficie y muestre los defectos existentes.

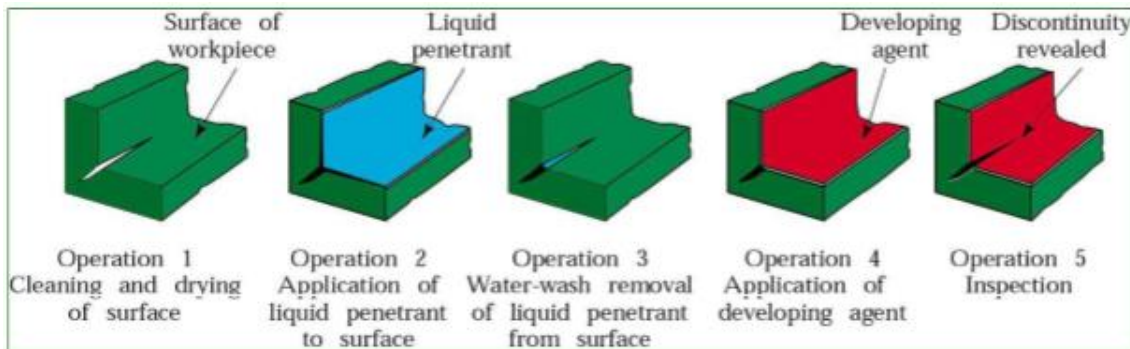


Figura 30. Procedimiento de líquidos penetrantes

A través de este método podemos analizar materiales no porosos metálicos o no metálicos. Los materiales metálicos más analizados por este método son materiales no ferromagnéticos como: aluminio, cobre, aleaciones ligeras, bronce, aceros inoxidables, latón... También se ensayan materiales ferromagnéticos como aceros al carbono y aceros aleados.

Materiales no metálicos ensayados habitualmente con este método son plásticos, goma, vidrio y cerámica plastificada.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
✓ Es un ensayo no destructivo que permite ensayar toda la superficie de la pieza.	✗ Este ensayo sólo detecta discontinuidades abiertas a la superficie y no puede detectar discontinuidades subsuperficiales.
✓ No importa el tamaño o la forma de la pieza.	✗ No se puede aplicar a materiales porosos.
✓ No necesita equipos complejos o caros.	✗ Todas las superficies a ensayar tienen que estar completamente limpias. No se puede utilizar en piezas pintadas, o con recubrimientos protectores.
✓ El ensayo puede realizarse de forma automatizada o manual, en taller o en obra.	✗ Los penetrantes son líquidos derivados del petróleo que pueden atacar a algunos materiales no metálicos, como compuestos de goma y algunos plásticos.
✓ Se puede realizar donde no hay suministro de electricidad o de agua.	✗ Los productos empleados en el ensayo por líquidos penetrantes son productos químicos que se tienen que manipular con las condiciones de seguridad adecuadas
✓ En general, es un ensayo económico, de poco coste.	
✓ Se puede aplicar a una amplia gama de materiales.	

Figura 31. Ventajas e inconvenientes de los líquidos penetrantes

6.3 Partículas magnéticas

Es un método de detección de defectos superficiales y subsuperficiales en la inspección de materiales ferromagnéticos. Aunque este método puede ser realizado durante y entre las operaciones de elaboración del componente, se realiza al final para asegurar que el producto terminado no tiene defectos perjudiciales.

Este método no es aplicable a materiales diamagnéticos (mercurio, oro, bismuto, zinc, cobre, plata o plomo), ni a materiales paramagnéticos (aluminio, magnesio, molibdeno, litio, cromo, platino, estaño o aceros inoxidables austeníticos). Solo es aplicable a materiales ferromagnéticos como el hierro, níquel, cobalto, gadolinio y la mayoría de los aceros.

El principio de este ensayo se basa en que si un imán tiene una discontinuidad en su superficie, esta discontinuidad interrumpirá el flujo uniforme de las líneas de fuerza, algunas de las cuales salen del propio sólido. Estas discontinuidades crean un propio campo magnético con un polo norte y un polo sur. Estas líneas de fuerza que salen del sólido se denominan fugas de flujo.

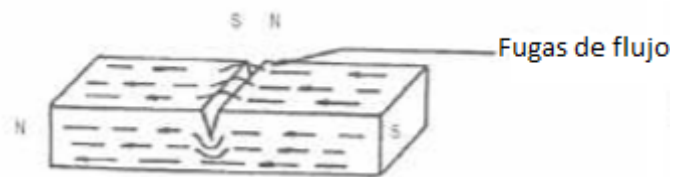


Figura 32. Fugas de flujo

Las líneas de fuerza que pasan a través del área de la grieta tienden a ser forzadas hacia la superficie. Son esas últimas las que causan fugas de flujo y forman los polos norte y sur donde se ha originado la grieta.

Esparcido partículas magnéticas por la superficie del componente, estas van a ver atraídas donde se produzcan las fugas de flujo, acumulándose en esa zona.

Se puede aplicar el mismo efecto para defectos subsuperficiales, ya que es capaz de detectar defectos cercanos a la superficie. El proceso se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Limpieza de la superficie a inspeccionar.
2. Generación de flujo de campo magnético.
3. Esparcir el polvo magnético.

4. Inspección visual.
5. Desmagnetizar.

6.4 Corrientes inducidas o parásitas (Eddy)

Es un método de detección de defectos para materiales conductores. Se coloca cerca del componente un campo magnético variable que induce una corriente eléctrica en caso de que el material sea conductor.

En caso de encontrar algún tipo de discontinuidad se producirán interrupciones en la corriente eléctrica, que como consecuencia producirán cambios en el campo magnético inducido. Detectando estos cambios podremos observar la presencia de defectos en la pieza.

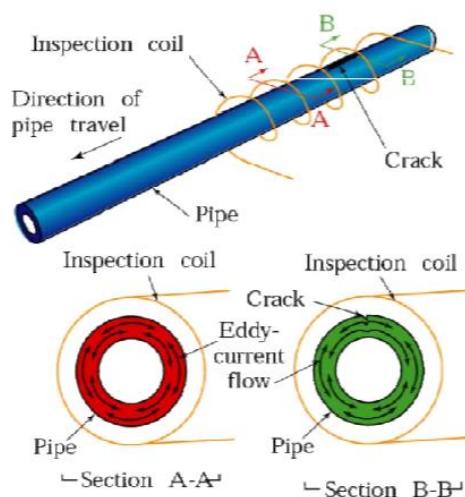


Figura 33. Técnica de corrientes inducidas.

6.5 Radiografías

Esta técnica se basa en la absorción de radiación electromagnética de alta frecuencia para la detección de defectos. A través de la radiación podemos obtener una imagen sombra de la estructura interna de un objeto.

Para una penetración profunda en el objeto, es necesario radiación de alta energía como Rayos-X y Rayos- γ .

La absorción de energía en el material depende de su número atómico Z y su densidad ρ . Metales pesados con alto número atómico se muestran más pesados, las radiaciones a alta frecuencia pero baja longitud de onda poseen menos capacidad de absorción en el material.

Los defectos son observados como grupos más oscuros, esto es debido a un coeficiente de absorción menor respecto del material en el que se encuentra.

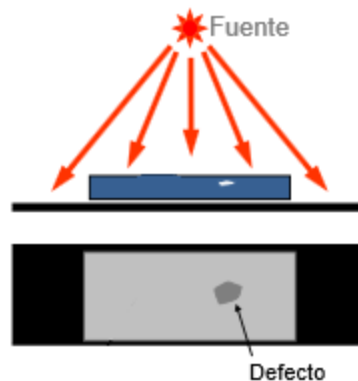


Figura 34. Defecto en radiografías.

6.6 Ultrasonidos

Se basa en la utilización de ondas de sonido a alta frecuencia para ubicar y detectar las discontinuidades en el elemento, dichas discontinuidades generan atenuaciones de flujo de las ondas de sonido de alta frecuencia.

Las ondas de sonido se transmiten a través de un transductor hasta el material, y se mide el tiempo en que tardan en volver las ondas (eco). Si el haz atraviesa dos materiales de diferente impedancia acústica (resistencia que opone un material a ser atravesado por el haz ultrasónico), al llegar a la superficie de separación entre ambos, una parte se refleja y otra pasa.

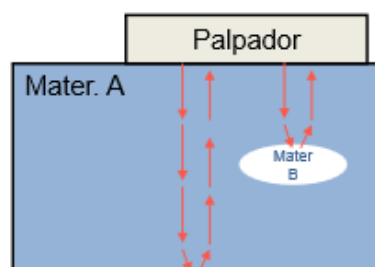


Figura 35. Materiales diferentes en ultrasonidos

7 Planteamiento del problema

Se va a estudiar cómo se comporta un cierto componente mecánico bajo una sollicitación de cargas y una serie de restricciones mecánicas. Para ello emplearemos un software de gran potencia y ampliamente utilizado hoy día en la industria, “Pro engineer”. Este software nos permite abarcar todos los campos de diseño asistido por ordenador en 3D, análisis e incluso aspectos de la fabricación de la pieza.

Pertenece a PTC (Parametric Technology Corporation), diseñado para poder ser utilizado desde el primer momento por el trabajador, además dispone de un menú de ayuda y de asistencia constante explicando lo que realiza cada función.

Nuestro elemento de trabajo va a consistir en un eje como el detallado a continuación:

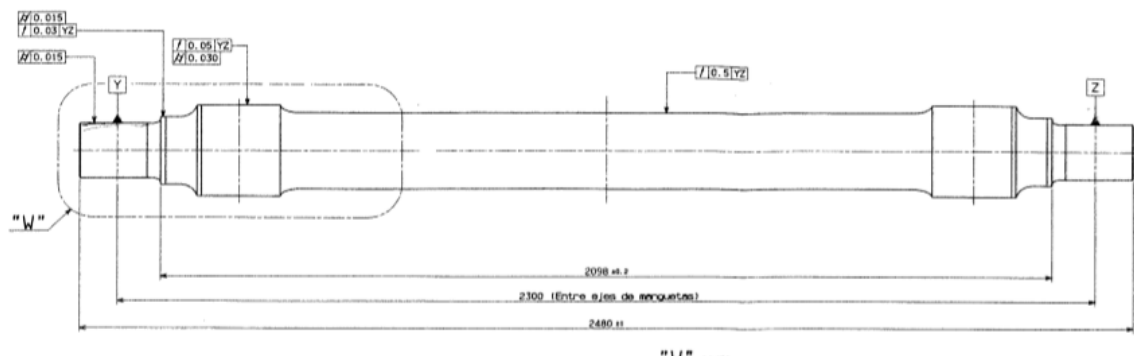


Figura 36. Eje mecánico de estudio

Los planos se detallan en el Anexo B.

La pieza dispondrá de dos apoyos que restringen el movimiento longitudinal en ejes “x”, “y” y “z”, sin embargo permiten el giro a lo largo del eje “x”.

Las cargas se distribuyen de manera superficial en los dos extremos del eje, en el siguiente apartado veremos el valor de esas cargas.

La pieza dispone de una simetría clara, lo que nos facilitará los cálculos más adelante en el software al emplear menor número de ecuaciones para la resolución del problema planteado.

Detallaremos la elaboración de la pieza en el siguiente apartado.

7.1 Diseño del eje

Comenzaremos abriendo nuestro entorno del programa y abriendo un nuevo proyecto, en este apartado debemos tener cuidado en elegir una plantilla de diseño que posea medidas en el sistema internacional (mm, N, s), de tal modo que lo primero que encontraremos será:

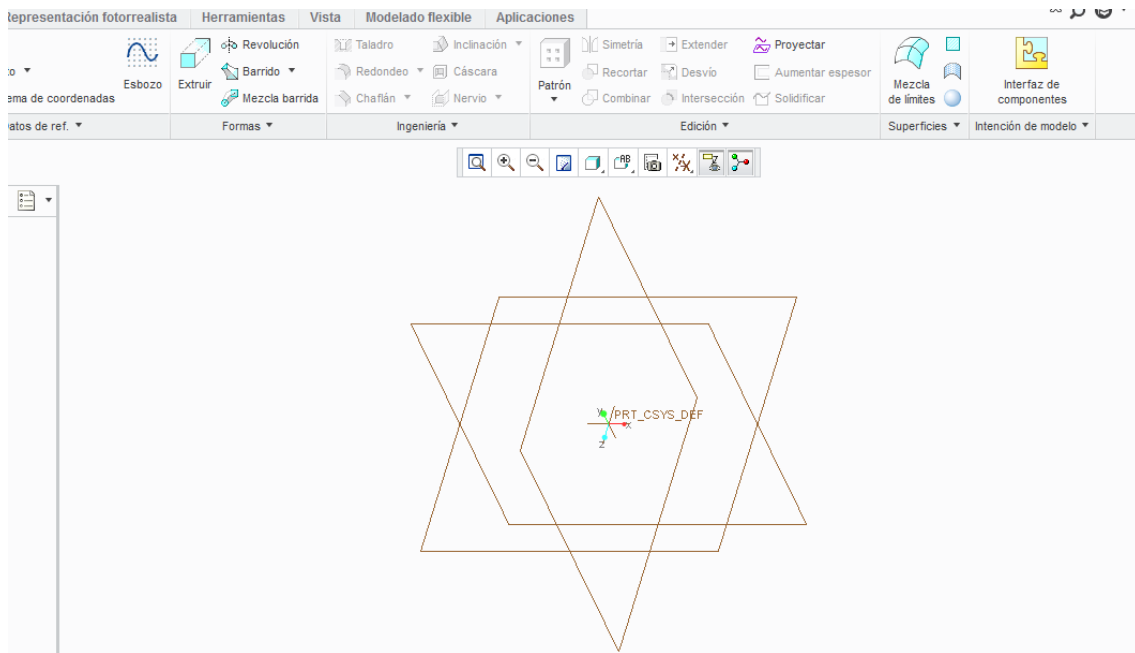


Figura 37. Entorno de “Creo Parametric”

Con el apartado boceto, elegiremos el plano en el cual queremos trabajar y con ayuda de los comandos de rectas, curvas, restricciones perpendiculares, paralelas y coincidentes podremos llegar a diseñar el perfil de la pieza.

Gracias a la simetría podremos simplemente diseñar la mitad de la pieza y de ese modo ahorrarnos gran cantidad de tiempo.

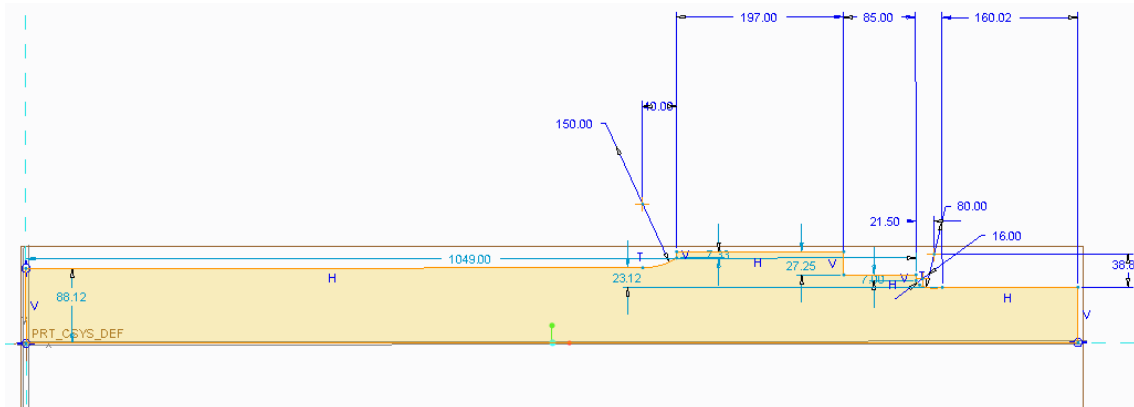



Figura 38. Boceto de revolución del eje

Con la opción de elaboración de la pieza por revolución  **Revolución** y definiendo el eje a partir del cual se realizará la revolución podemos conseguir la siguiente figura:

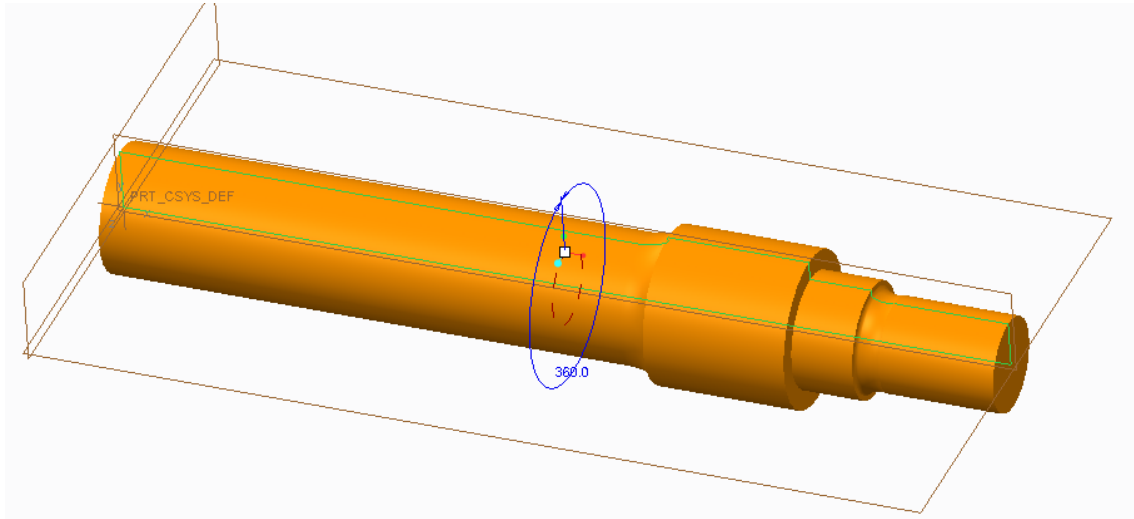


Figura 39. Eje por revolución

Debemos hacer dos redondeos en los extremos del apoyo de la pieza con la función redondeo

 **Redondeo** , uno de 40mm y otro de 15mm

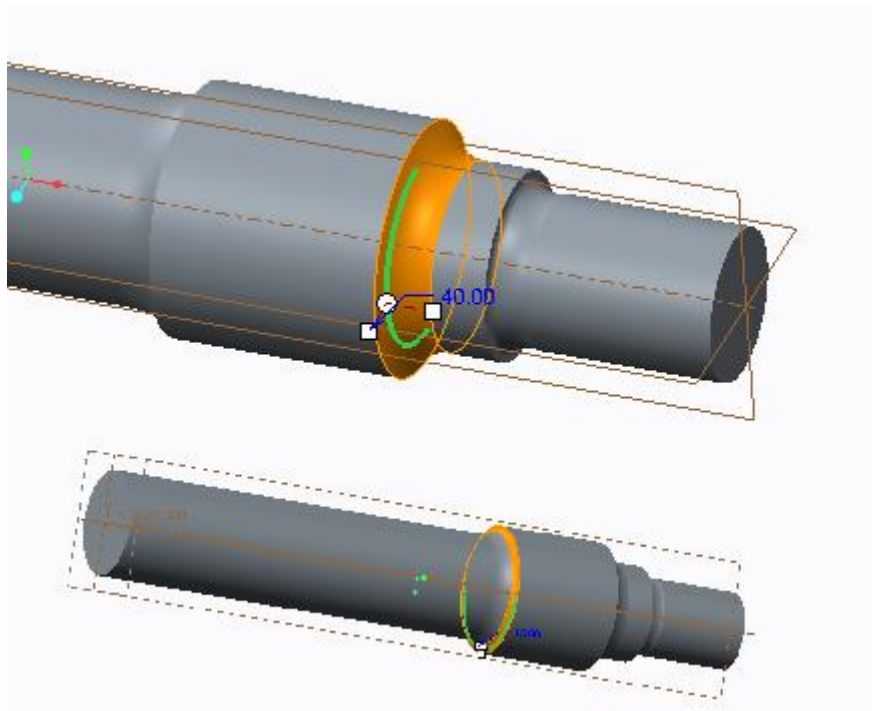


Figura 40. Redondeos en eje

De esa manera tendremos ya diseñado la mitad del eje para poder hacer sobre la pieza toda la configuración de cargas y simetrías:

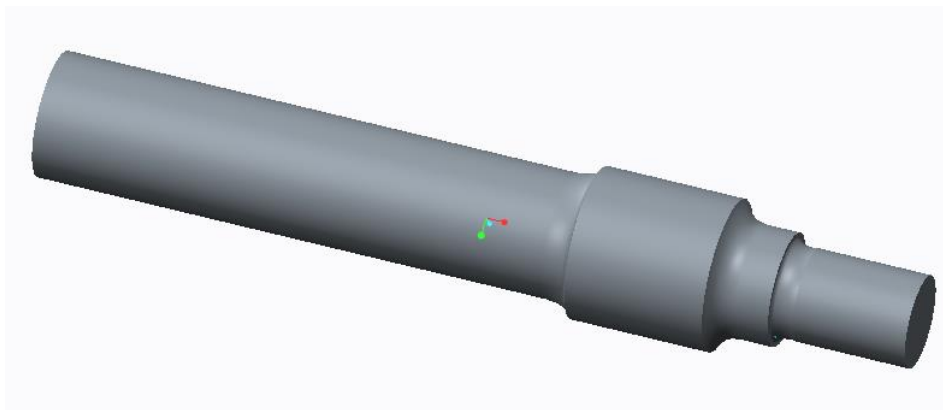


Figura 41. Eje modelado en 3D

7.2 Condiciones de funcionamiento de eje

El material del eje será un acero de baja aleación 25CrMo4 (0.25%C, 0.4%Si, 0.75%Mn, 1.05%Cr y 0.22%Mo), con un acabado superficial de granallado. Debemos introducir las características del material en el apartado definición de material, y posteriormente asignarlo a la pieza.

Definición de material

Nombre: ACERO_25CRMO4

Descripción:

Densidad: 7850 kg/m³

Aspecto visual: Definido por el usuario

Estructural: Simetría: Isótropo

Respuesta de tensión-deformación: Lineal

Coeficiente de Poisson: 0.27

Módulo de Young: 205000 MPa

Coef. de expansión térmica: /C

Amortiguación de mecanismos: sec/mm

Límites de material:

Límite elástico en tracción *: 490 MPa

Límite de resistencia a la tracción *: 656 MPa

Límite de resistencia a la compresión: MPa

* Campos obligatorios

Criterio de rotura: Energía de distorsión (Von Mises)

Fatiga: UML (Ley uniforme de materiales)

Tipo de material: Aceros de baja aleación

Acabado superficial: Granallado

Factor de reducción de la resistencia a la fatiga: 1.672

Aceptar Cancelar

Figura 42. Características del material

Una vez asignado el material elegido, deberemos elegir y localizar el campo de fuerzas que va



a actuar a lo largo de la pieza. Para ello empleando la aplicación [simulate](#) que encontramos dentro del propio “Creo Parametric” podremos visualizar todo el menú en el que encontramos las cargas, restricciones, mallado, material...

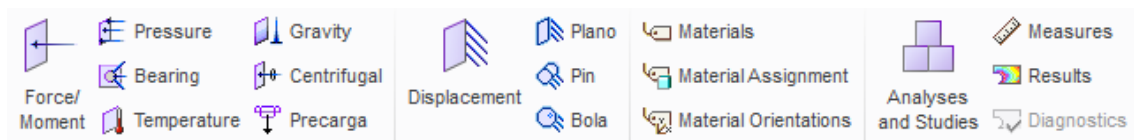


Figura 43. Opciones de “Creo Simulate”

Haciendo uso de la sección Force/Moment Load elegimos una carga vertical de valor negativo de 125KN a lo largo de toda la superficie superior del extremo del voladizo tal como se detalla en la figura.

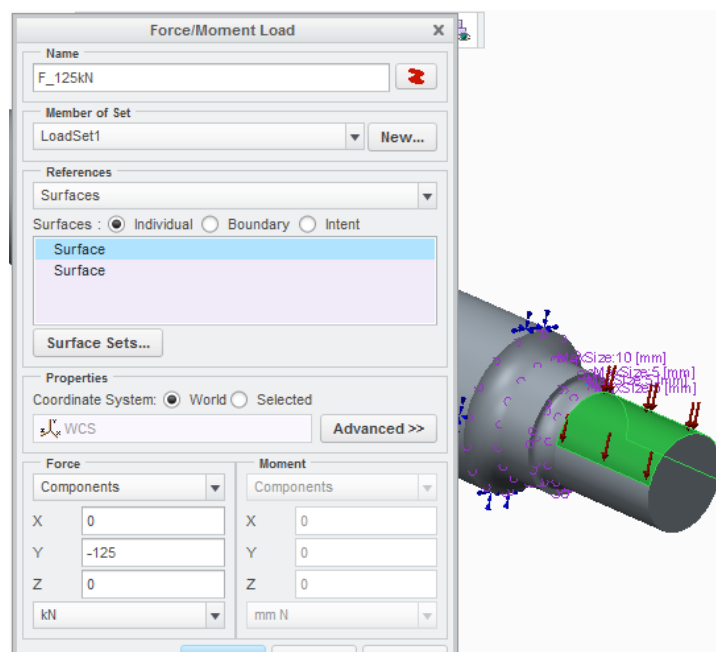


Figura 44. Carga aplicada

Para determinar el apoyo debemos fijar los desplazamientos en la todas las direcciones como empotramientos, sin embargo vamos a permitir el giro a lo largo del eje X para poder realizar la funciones de eje como tal.

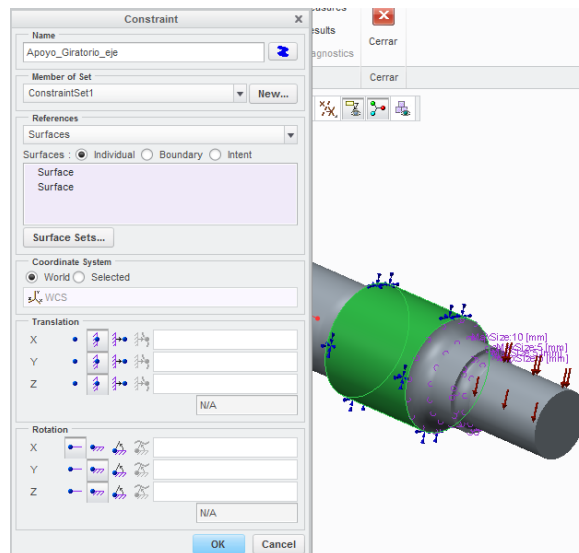


Figura 45. Restricciones mecánicas

En cuanto a los mallados, emplearemos un mallado más pequeño en las zonas más críticas concretamente con tamaños de elemento de 10mm y 5mm como máximo. Con ello conseguiremos una mayor exactitud en el cálculo de elementos finitos.

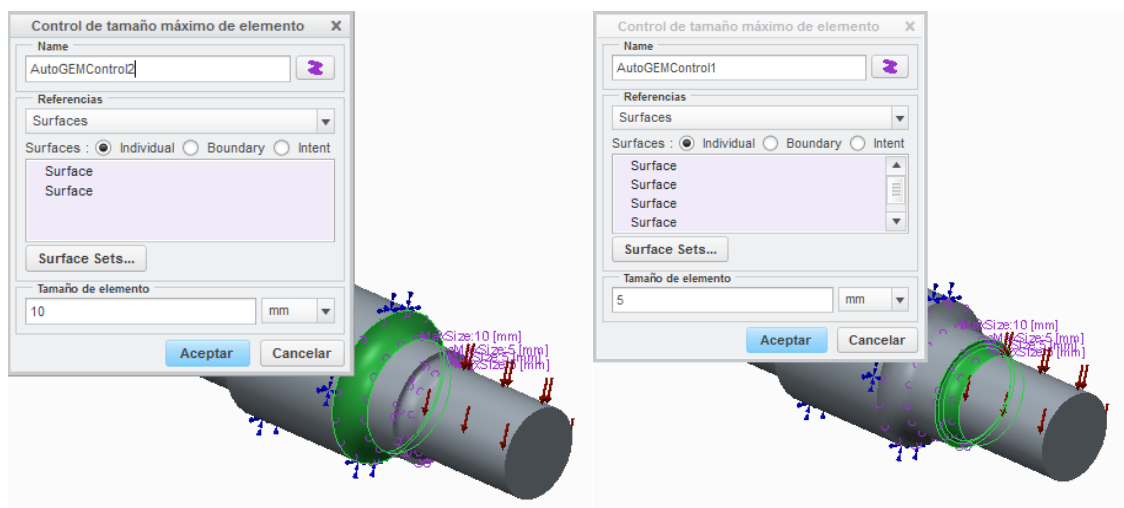


Figura 46. Mallado 10mm y mallado 5mm

Para ser más realistas en nuestros análisis vamos a incluir una carga de gravedad a lo largo de toda la pieza con una aceleración de la gravedad g de 9.8m/s^2

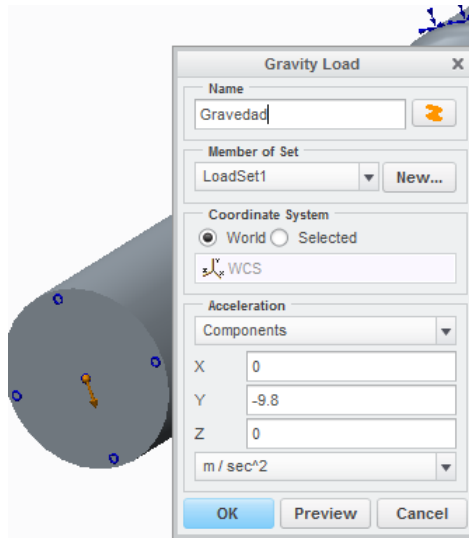


Figura 47. Fuerza de gravedad

Y por último se definirá debido a la aparición de simetría una coacción en el corte central de la pieza de tipo “simetry” y superficial.

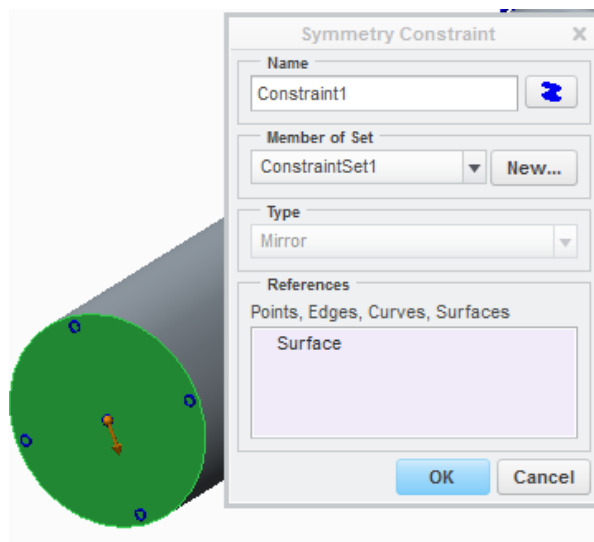


Figura 48. Restricción por simetría

De este modo tendremos la pieza completamente diseñada y con toda la disposición de características necesarias para su análisis.

Haciendo clic sobre la pestaña “Analyses and Studies” podemos acceder a un nuevo panel, y a través de File>NewStatic..., a una nueva ventana para poder definir el nombre del análisis, combinar acciones o definir el grado de exactitud del análisis (a mayor exactitud mucho mayor tiempo de análisis). Emplearemos un Plotting Grid de valor 8 en escala de 0 a 10 para poder asumir una relación de (tiempo de análisis)/ (calidad de los resultados) bastante buena.

De esta manera para un análisis estático de la mitad de la pieza sin fisuras los resultados obtenidos para tensión máxima (MPa) y deformación máxima (mm) se muestran en las dos imágenes a continuación:

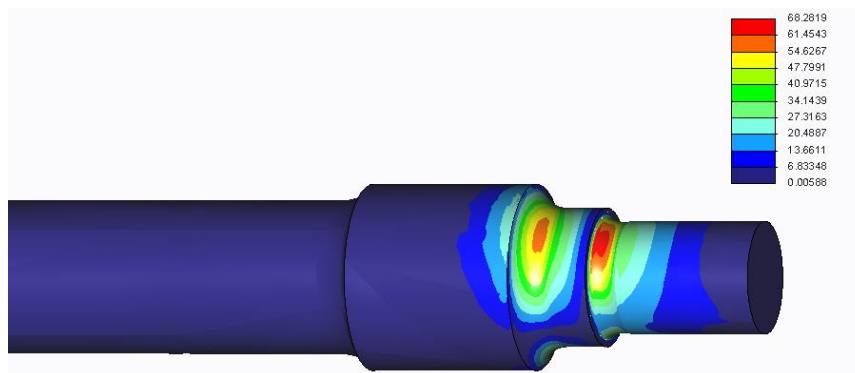


Figura 49. Distribución de tensiones del eje sin fisura aplicando simetría

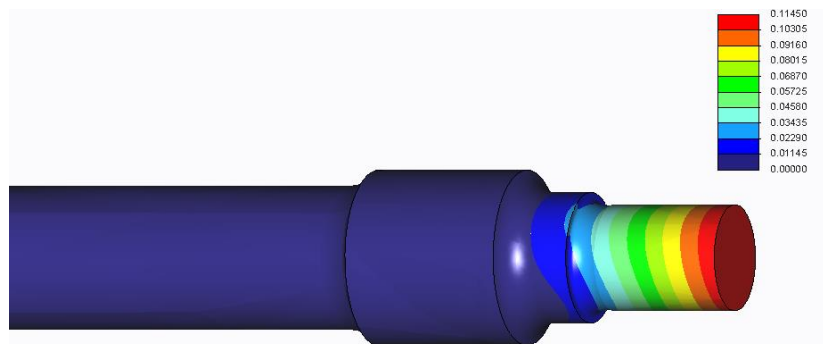


Figura 50. Desplazamiento máximo del eje sin fisura aplicando simetría

Realizando el mismo procedimiento pero esta vez sobre el eje completo podemos observar que la tensión máxima que encontramos es de 40MPa a diferencia de los 62MPa de la mitad del eje. El desplazamiento máximo también es menor (0.06mm comparado con 0.11mm) por tanto al ser más restrictivo la mitad del eje de aquí en adelante trabajaremos con él para los sucesivos comportamientos con fisuras.

Las figuras muestran la distribución de la tensión máxima (MPa) y deformación máxima (mm) para un análisis considerando el eje completo sin emplear simetría.

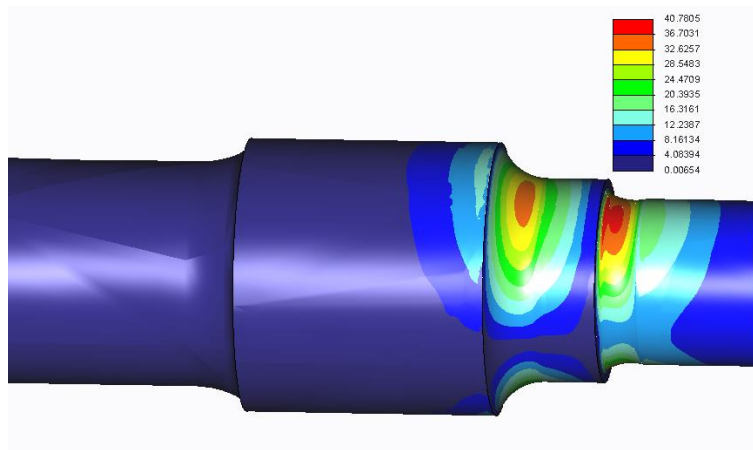


Figura 51. Distribución de tensiones del eje completo

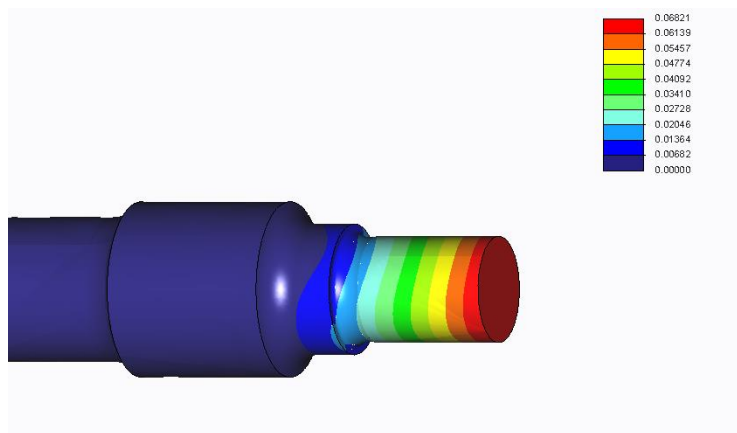


Figura 52. Desplazamiento máximo del eje completo

8 Análisis estático del eje fisurado

8.1 Creación de la grieta

Una vez analizado el eje sin fisuras, observamos que la parte más crítica y a la cual debemos prestar mayor atención corresponde al último redondeo más próximo a la parte externa del voladizo.

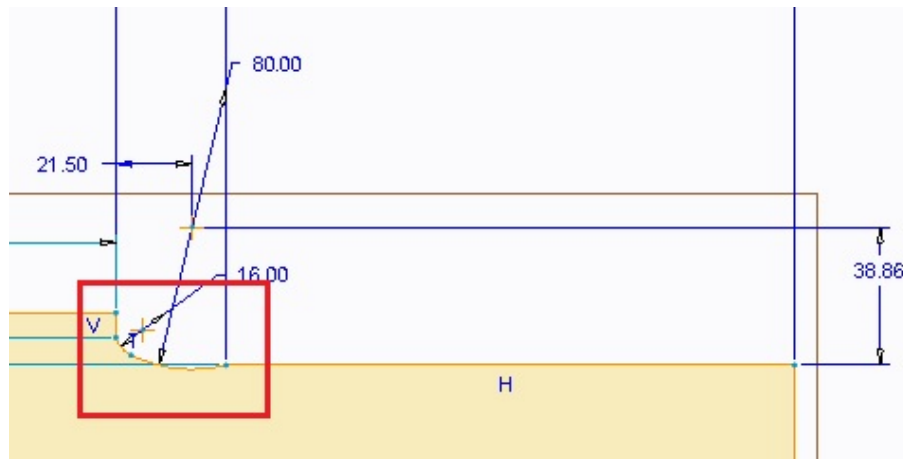


Figura 53. Zona crítica en boceto

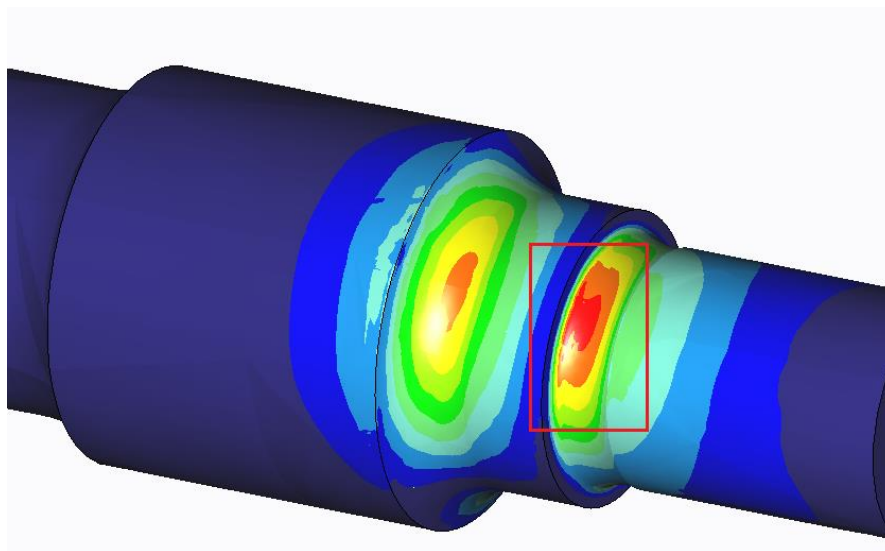


Figura 54. Zona crítica en distribución de tensiones

Por ello, la localización de la grieta será lo más centrado posible a ese lugar crítico. De esta manera podremos estudiar el caso más desfavorable posible, que será cuando se produzca una grieta en el lugar de máxima concentración de tensiones.

La grieta que vamos a emplear para poder analizar el comportamiento del eje fisurado se corresponde con un vaciado en dirección transversal al eje.

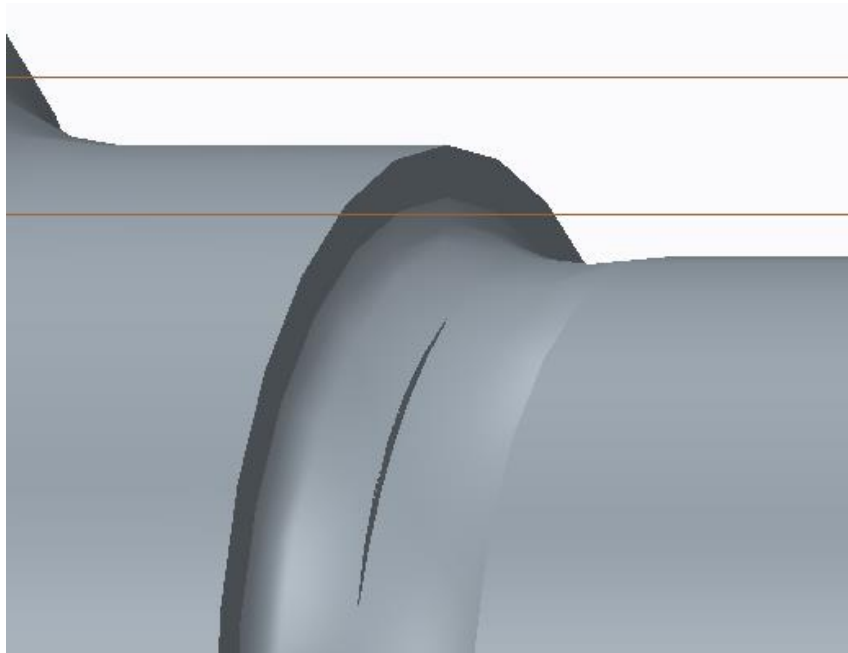


Figura 55. Grieta en eje

Para realizar la grieta con nuestro software “Creo Parametric” vamos a emplear el módulo



extruir **Extruir** y posteriormente elegiremos el plano frontal para dibujar el boceto previo a la extrusión. La grieta se localizará lo más cerca del punto de máxima tensión del eje sin fisura.



Figura 56. Plano frontal eje fisurado

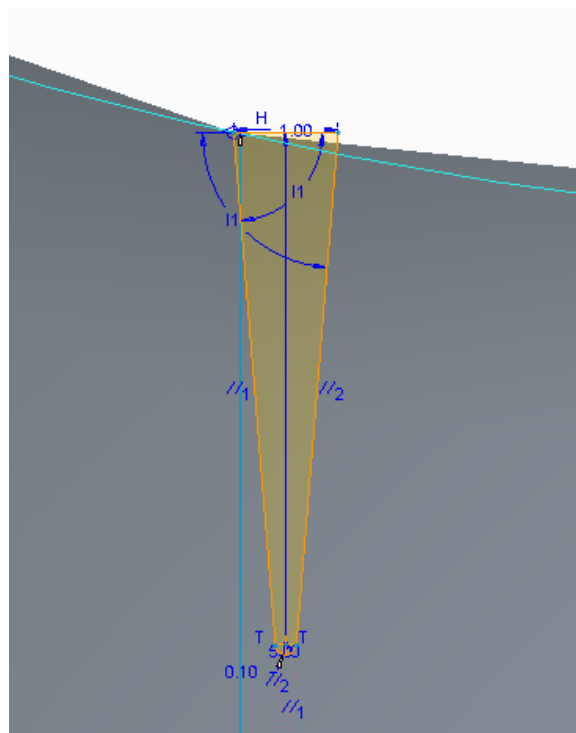


Figura 57. Boceto grieta

La grieta poseerá una sección triangular de base 1mm y de profundidad variable, con un radio de acuerdo en su extremo de 0,1mm . Este radio de acuerdo de 0,1mm se realiza para evitar concentración de tensiones en el fondo de la grieta y para evitar problemas de convergencia en los análisis llevados a cabo con Creo Parametric.

Es importante que en la definición de los parámetros geométricos de la grieta, la profundidad de la grieta la establezcamos como un parámetro h que debemos definir previamente en el apartado “*parámetros*” perteneciente al módulo “*intención del modelo*”.

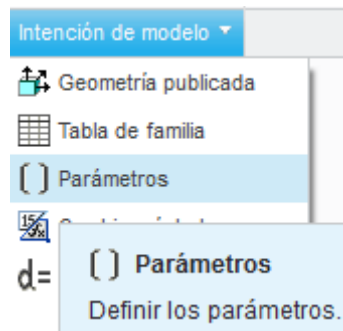


Figura 58. Definición de parámetros

Dicho parámetro “ h ” será un número real, que corresponde con la longitud inicial de la grieta, tomará el valor de 5mm.

Definir una medida de la geometría de la pieza como un parámetro, puede resultarnos de gran utilidad para los análisis posteriores, ya que el programa podrá ir variando la profundidad la grieta dentro de unos márgenes establecidos, para realizar múltiples análisis sin necesidad de ir uno por uno.

Una vez realizado el boceto de extrusión, y eligiendo el apartado “*Eliminar material*” podremos hacer el vaciado de la grieta en nuestro componente.

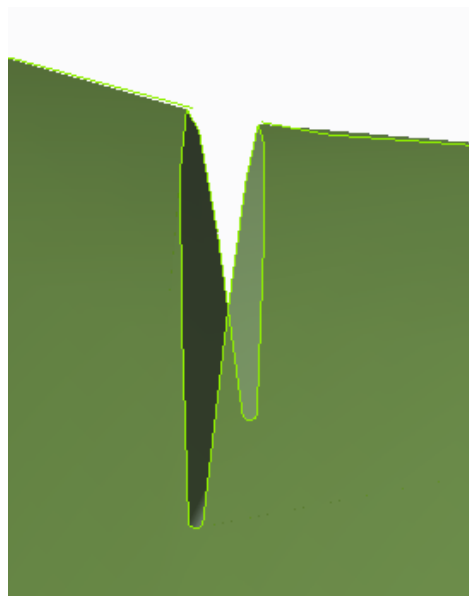


Figura 59. Grieta terminada 3D

Una vez hayamos parametrizado la fisura, debemos analizar el elemento mecánico, sin embargo, para la utilización del método CTOD (crack tip opening displacement) es necesario conocer el desplazamiento relativo entre la superficie de los labios de la grieta. La obtención del parámetro CTOD se encuentra explicado en el apartado 8.4.

Para conocer la apertura de la grieta colocaremos en el extremo superior de cada labio de la grieta un punto de medición que encontraremos en el apartado “*measures*”, estableciendo como medida del desplazamiento horizontal el milímetro. También colocaremos en el fondo de la grieta otros dos puntos de medición para saber la tensión máxima tras el análisis, en esta ocasión tomaremos como medida MPa.

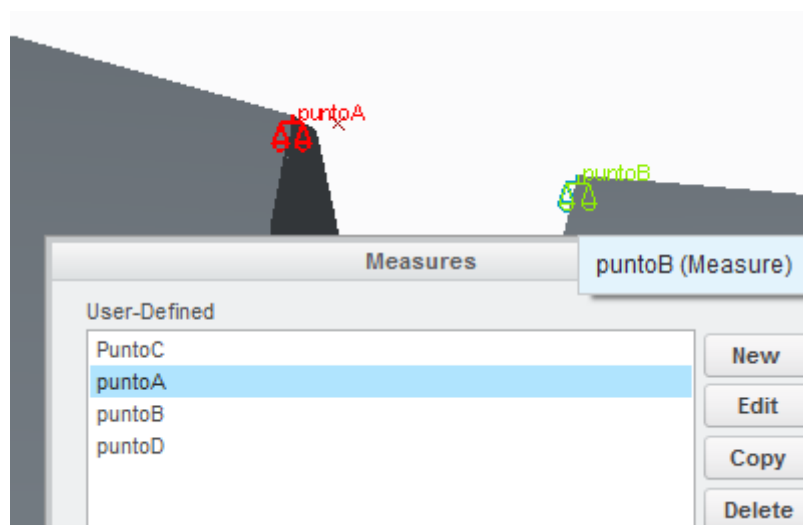


Figura 60. Puntos de medición

8.2 Parámetros previos del análisis a fatiga

Debemos calcular el factor de concentración de tensiones mencionado anteriormente para los ensayos relativos a fatiga. Para ello necesitamos los siguientes datos:

$$\frac{r}{d} = \frac{8}{130} = 0.0615$$

Donde:

r: es el radio del redondeo [mm].

d: es el diámetro de la sección menor [mm].

$$\frac{D}{d} = \frac{159.5}{130} = 1.2269$$

Donde:

D: es el diámetro de la sección superior del redondeo [mm].

d: es el diámetro de la sección inferior del redondeo [mm].

Con estos datos y con la ayuda de la gráfica que muestra la relación entre $\frac{D}{d}$, $\frac{r}{d}$ y K_t podemos obtener el valor de K_t :

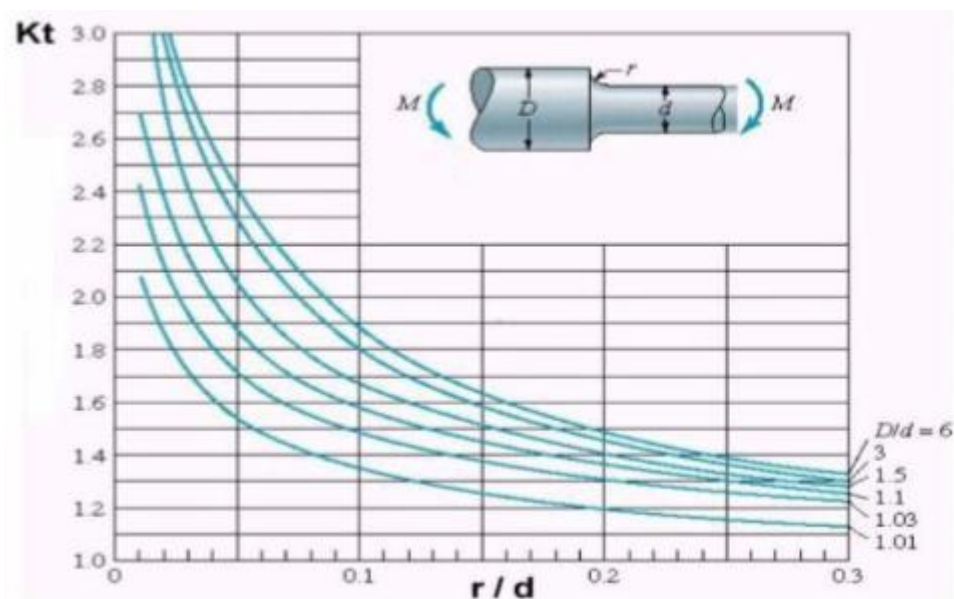


Figura 61. Gráfica de obtención de K_t

De esta manera obtenemos un valor de concentración de tensiones teórico K_t de:

$$K_t = 1.82$$

También es necesario determinar el factor de sensibilidad a las ranuras, para ello debemos conocer el límite de resistencia a tracción:

$$S_{ut} = 656 \text{ GPa}$$

Y a través de la siguiente gráfica obtenemos el factor de sensibilidad a las ranuras q :

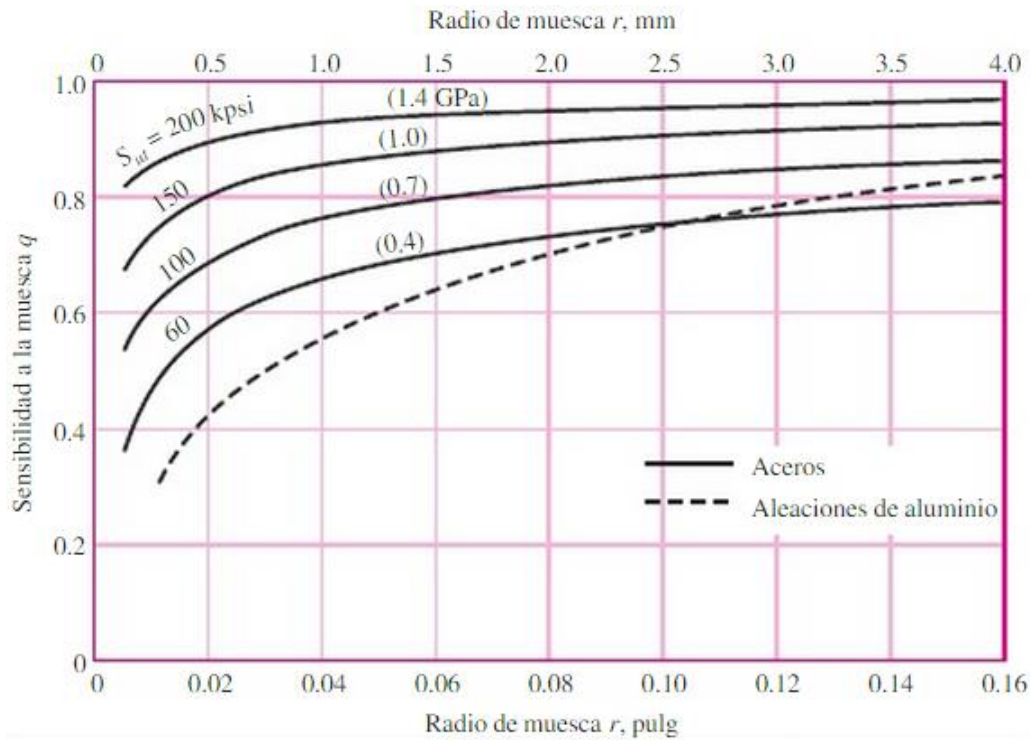


Figura 62. Gráfica de obtención de la sensibilidad a las ranuras “ q ”

La sensibilidad a las ranuras q para este material es:

$$q = 0.82$$

El factor de resistencia a la fatiga R_f se calcula como:

$$R_f = q \cdot (K_t - 1) + 1$$

Donde:

K_t : es el valor de concentraciones teórico.

q : es el factor de sensibilidad a las ranuras.

Por tanto obtenemos un valor de factor de resistencia a la fatiga de:

$$R_f = 1.697$$

Sabiendo que el factor de reducción de resistencia a la fatiga K_{rf} (necesario para el análisis a fatiga en pro engineer) es la inversa del factor de concentración de tensiones K_e y esta a su vez es la inversa del factor de resistencia a la fatiga R_f , obtenemos K_{rf} como:

$$K_{rf} = \frac{1}{K_e} = R_f = 1.697$$

Este valor será necesario introducirlo en las propiedades del material con anterioridad a realizar la simulación.

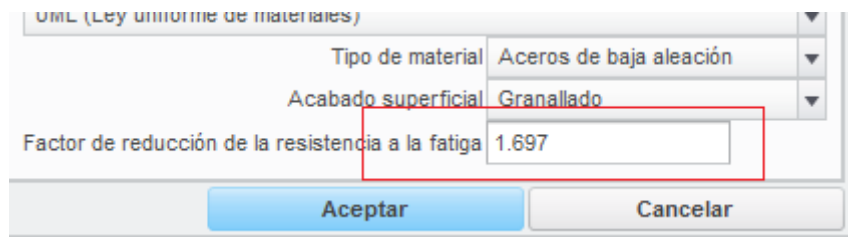


Figura 63. Factor de concentración de tensiones en definición de material

El desarrollo de los pasos que se llevan a cabo con el software son iguales que en los análisis estáticos con la diferencia que al llevar a cabo la simulación deberemos seleccionar File>NewFatigue y obtendremos el siguiente cuadro de diálogo:

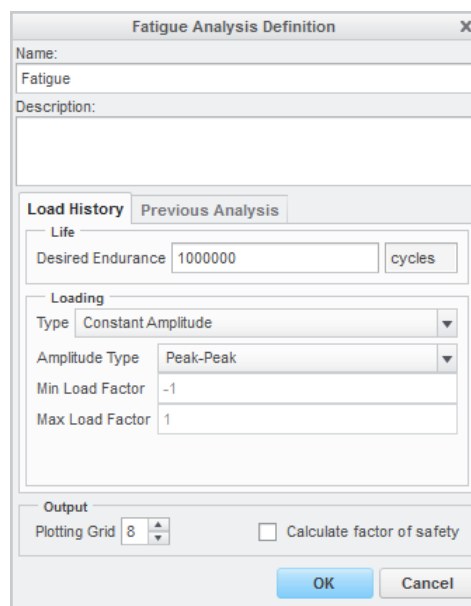


Figura 64. Cuadro de análisis a fatiga

Donde:

- Desired Endurance: es la vida deseada. En nuestro caso vamos a estudiar el comportamiento a fatiga para vida infinita, es decir, 10^6 ciclos.
- Amplitude Type: Tipo de carga deseada para el análisis. Elegimos una carga alternante de valor máximo y mínimo, es decir, Peak-Peak con factores 1 y -1.
- Plotting Grid: El grado de refinamiento que vamos a utilizar en los análisis. Emplearemos un nuevo valor de 4 (en escala de 1 a 10) debido al largo tiempo de simulación.

En previous analysis puede resultar interesante marcar la casilla “use static analysis results from previous design study”, ya que con ello aprovecharemos datos de los análisis estáticos realizados con anterioridad para facilitar y agilizar el trabajo en fatiga.

8.3 Análisis estático del eje fisurado



Para poder analizar el eje, emplearemos el apartado “Analyses and studies” en el cual abriremos un nuevo análisis de sensibilidad “new sensitivity design study” y de esta manera podremos variar los valores de la profundidad de la grieta desde 2mm hasta 16mm en los incrementos deseados. Es importante realizar un análisis estático previo en el que pueda apoyarse este análisis.

Una vez se lleve a cabo el análisis, elegimos que resultados queremos observar representados en una gráfica en función de la profundidad de la grieta. En este caso nos interesa conocer el desplazamiento del punto A (punto de la izquierda el labio de la grieta) y el desplazamiento del punto B (punto del labio derecho de la grieta). Podemos observar los resultados en las siguientes ilustraciones.

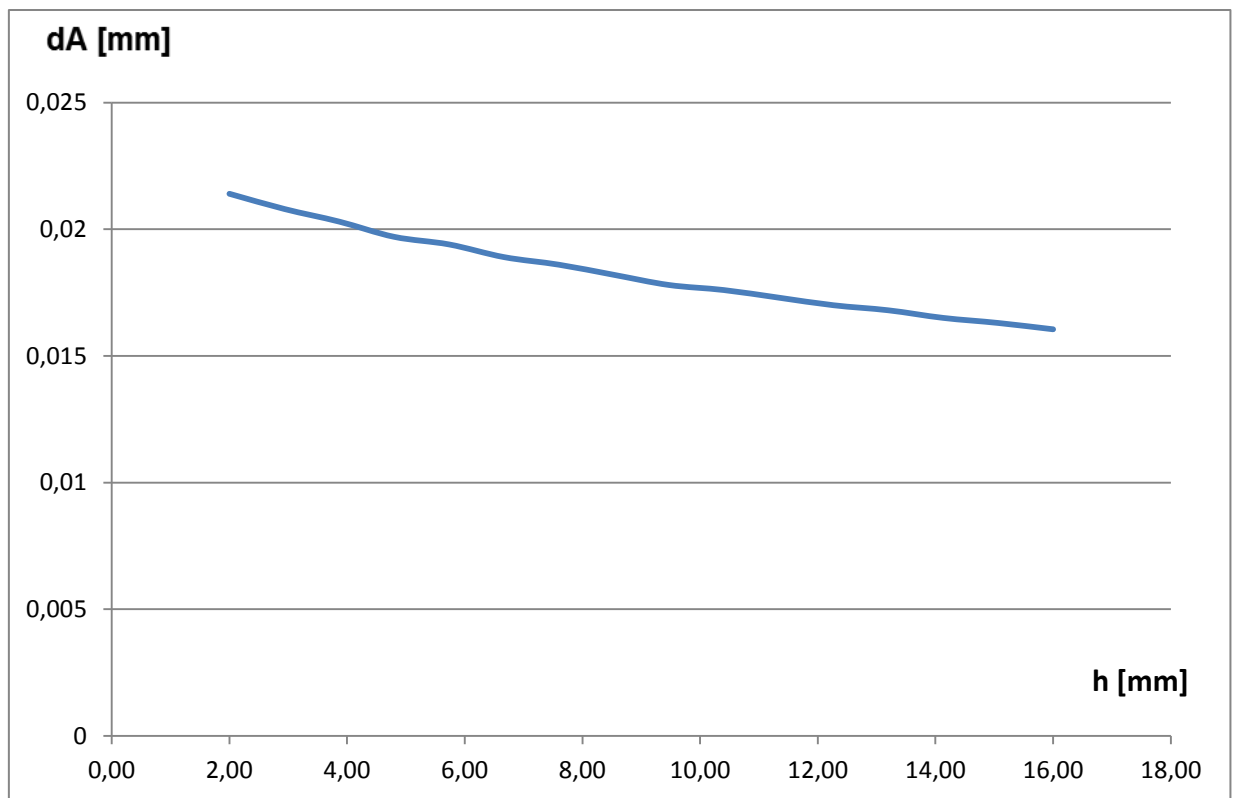


Figura 65. Desplazamiento labio izquierdo grieta en función de la profundidad de la grieta

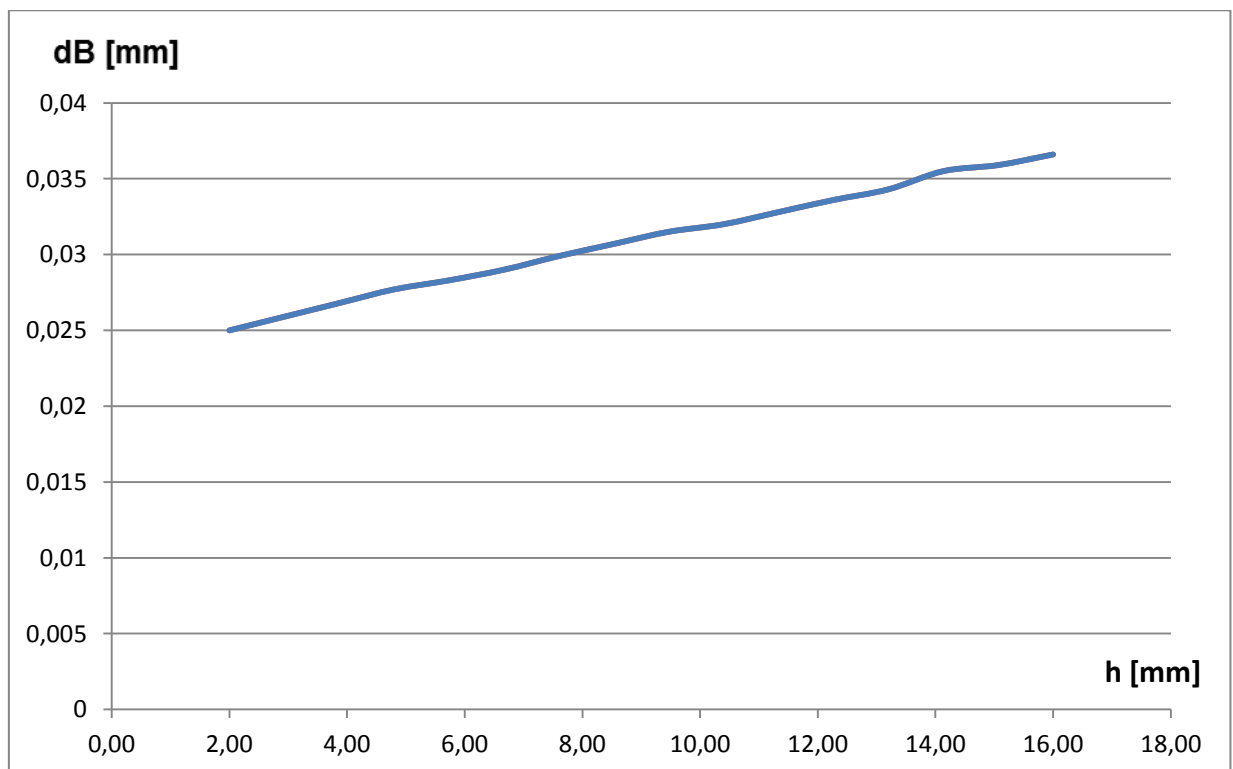


Figura 66. Desplazamiento del labio derecho de la grieta en función de la profundidad de la grieta

Las gráficas obtenidas con Creo Parametric se encuentran en el anexo C y D.

8.4 Fractura elasto-plástica

Si la deformación no-lineal está comprendida en una región muy pequeña del frente de la grieta, podemos utilizar la mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL), sin embargo en muchos casos se hace muy difícil la caracterización mediante MFEL y se recurre a la mecánica de fractura elastoplástica (MFEP), que admite deformaciones más severas antes de la rotura.

Para el estudio de la profundidad crítica de la grieta emplearemos el método de la apertura del frente de la grieta CTOD (crack tip opening displacement). Gracias a él, podremos obtener el valor del factor de intensidad de tensiones para una profundidad de grieta dada.

En 1961 Wells estaba realizando ensayos en diferentes aceros para determinar el factor de intensidad de tensiones crítico (o tenacidad a la fractura) K_{IC} . Se dio cuenta de que la grieta se enromaba en su frente y que a mayor enromamiento mayor tenacidad a fractura poseía el material. Así, debía haber alguna manera de relacionar la apertura del frente de la grieta con la tenacidad del material.

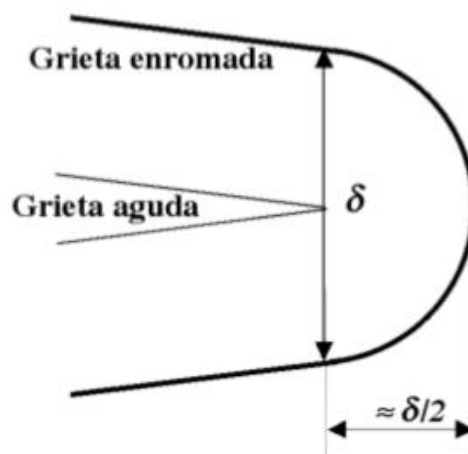


Figura 67. Enromamiento de la grieta.

De esta manera se puede establecer que la grieta se propaga relacionando el valor de intensidad de tensiones con el valor CTOD asumiendo plastificación en el frente de la grieta [2].

Considerando la aproximación de Dugdale, placa infinita y tensión plana podemos llegar a una ecuación que relaciona el parámetro CTOD con el factor de intensidad de tensiones K_I como la siguiente:

$$\delta = CTOD = \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_{ys}} \quad (8.1)$$

Donde:

K_I : Intensidad de tensiones [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$].

E : Módulo de Young del material [MPa].

σ_{ys} : Límite elástico del material [MPa].

8.4.1 Parámetro CTOD

Para la obtención experimental del valor de CTOD en laboratorio, las probetas son sometidas a ensayos de flexión en tres puntos. Se mide el desplazamiento V que se produce entre los labios de la fisura y el valor del CTOD se determina como si las dos partes de la probeta a flexión fueran rígidas y rotaran sobre un apoyo simple como podemos observar en la imagen.

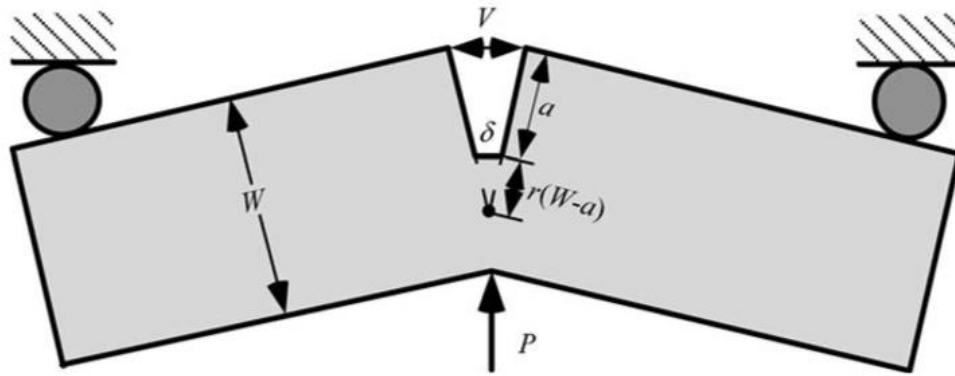


Figura 68. Probeta a flexión con fisura

Geoméricamente determinamos el valor CTOD (δ) a través de la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{r \cdot (W-a) \cdot V}{r \cdot (W-a) + a} \quad (8.2)$$

Donde:

r: Un factor rotacional determinado experimentalmente. Toma el valor de 0.44

w: Anchura de la probeta [mm].

a: Profundidad de la grieta [mm].

V: Apertura de los labios de la grieta [mm].

8.4.2 Resultados del parámetro CTOD

Realizando varios ensayos, en los que se mantiene constante la anchura de la probeta (W) en 130mm, se han obtenido variaciones de la apertura de la superficie de la grieta. Relacionando la apertura de la grieta (V), con los parámetros de anchura de la grieta (W), profundidad de la grieta (a) y el factor rotacional (r) a través de la ecuación 8.2, obtenemos los siguientes resultados:

También se ha expresado la profundidad de la grieta en porcentaje de radio del eje para poder tener una visión más global de la profundidad.

Tabla 4. Determinación del parámetro CTOD.

%R	a [mm]	dA [mm]	dB [mm]	(dB-dA)=V [mm]	ξ CTOD
3,08	2,00	0,0214	0,025	0,0036	0,00348
4,51	2,93	0,0208	0,0259	0,0051	0,00485
5,95	3,87	0,0203	0,0268	0,0065	0,00608
7,38	4,80	0,0197	0,0277	0,008	0,00736
8,82	5,73	0,0194	0,0283	0,0089	0,00806
10,26	6,67	0,0189	0,029	0,0101	0,00899
11,69	7,60	0,0186	0,0299	0,0113	0,00990
13,13	8,53	0,0182	0,0307	0,0125	0,01078
14,56	9,47	0,0178	0,0315	0,0137	0,01162
16,00	10,40	0,0176	0,032	0,0144	0,01202
17,44	11,33	0,0173	0,0328	0,0155	0,01274
18,87	12,27	0,017	0,0336	0,0166	0,01342
20,31	13,20	0,0168	0,0343	0,0175	0,01392
21,74	14,13	0,0165	0,0355	0,019	0,01488
23,18	15,07	0,0163	0,0359	0,0196	0,01510
24,62	16,00	0,01605	0,0366	0,02055	0,01558

Donde:

dA: El desplazamiento del punto A (labio izquierdo de la grieta). [mm]

dB: El desplazamiento del punto B (labio derecho de la grieta). [mm]

V: La diferencia de ambos desplazamientos (apertura de la grieta). [mm]

Con los valores obtenidos del parámetro CTOD, podemos despejar la ecuación 8.1 para poder despejar el valor del factor de intensidad de tensiones K_I .

$$K_I = \sqrt{\sigma_{ys} \cdot E \cdot \delta} \quad (8.3)$$

De esta manera los valores de intensidad de tensiones para cada valor de profundidad de grieta quedan recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de intensidad de tensiones.

%R	h [mm]	δ CTOD	K_I [MPa]
3,08	2,00	0,00348	18,68740
4,51	2,93	0,00485	22,06257
5,95	3,87	0,00608	24,70623
7,38	4,80	0,00736	27,18808
8,82	5,73	0,00806	28,44571
10,26	6,67	0,00899	30,05901
11,69	7,60	0,00990	31,53909
13,13	8,53	0,01078	32,90515
14,56	9,47	0,01162	34,17201
16,00	10,40	0,01202	34,75323
17,44	11,33	0,01274	35,76723
18,87	12,27	0,01342	36,71807
20,31	13,20	0,01392	37,39835
21,74	14,13	0,01488	38,65610
23,18	15,07	0,01510	38,94725
24,62	16,00	0,01558	39,56051

Para determinar a partir de qué valor de profundidad de la grieta se produce una propagación de esta vamos a recurrir a una hipótesis considerando que $K_{I \text{ mín}} = -K_{I \text{ máx}}$.

8.4.3 Hipótesis $K_{I \text{ mín}} = -K_{I \text{ máx}}$.

De entre muchos de los investigadores que se apoyaron en la Ley de Paris para estudiar el crecimiento de fisuras a fatiga, podemos destacar a Carpinteri, que estudió la evolución de una fisura semielíptica de una barra sometida a una carga axial cíclica con una amplitud constante.

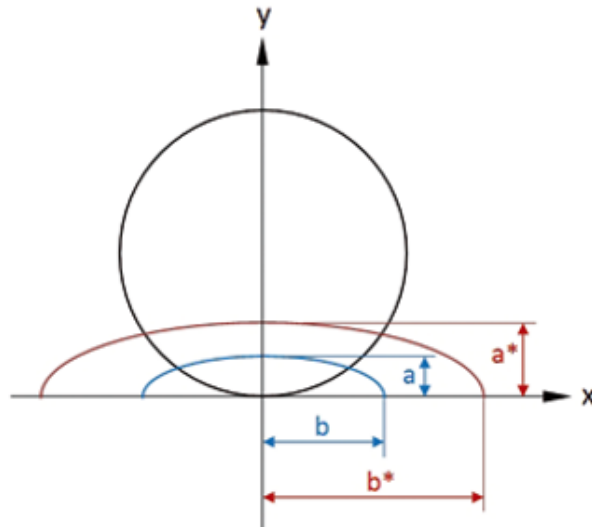


Figura 69. Fisura elíptica en barra circular

En nuestro estudio, la grieta es una aproximación a este tipo de fisuras elípticas, ya que su sección es recta, sin embargo a efectos de cálculo podemos emplear la misma hipótesis.

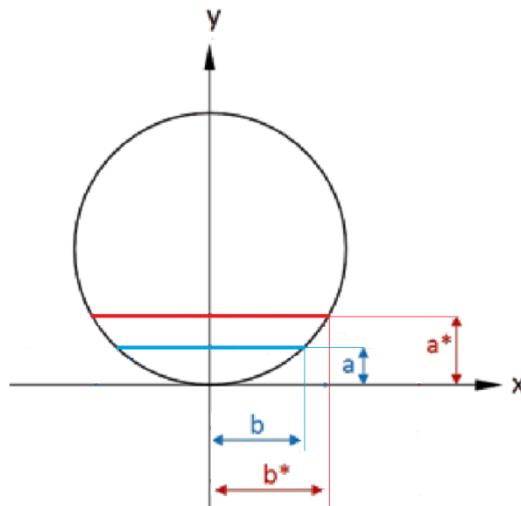


Figura 70. Fisura recta en barra circular

En otros estudios posteriores, Carpinteri analizó la propagación de una fisura en un eje cilíndrico sometido a flexión rotativa. Este autor consideró que en un giro completo, se obtiene un valor máximo y otro mínimo del factor de intensidad de tensiones [5]. Siendo $K_{I \text{ mín}} = -K_{I \text{ máx}}$, por tanto la variación del factor de intensidad de tensiones se expresa como:

$$\Delta K_I = K_{I \text{ máx}} - K_{I \text{ mín}} = 2K_{I \text{ máx}} \quad (8.4)$$

El factor de intensidad de tensiones crítico (K_{IC}) para el acero AE4T toma el valor de $73\text{MPa}\sqrt{m}$.

Para esta hipótesis por tanto:

$$\Delta K_I = 2K_I \quad [\text{MPa}\sqrt{m}]$$

Para los valores obtenidos de intensidad de tensiones a través del método CTOD anterior podemos establecer una propagación de la grieta por encima de valores de profundidad de la misma de 11.33mm (17,44%). Es decir, a partir de una grieta cuya profundidad equivale al 17,44% del radio, el factor de intensidad de tensiones (FIT) alcanza el valor de la tenacidad a fractura del material, y por ello se produce propagación de la grieta.

Tabla 6. Propagación de la grieta en hipótesis $K_{I \min} = -K_{I \max}$

%R	h [mm]	ξ CTOD	K_I [MPa]	ΔK_I [MPa]
3,08	2	0,00348	18,6874	37,3748
4,51	2,93	0,00485	22,06257	44,12514
5,95	3,87	0,00608	24,70623	49,41246
7,38	4,8	0,00736	27,18808	54,37616
8,82	5,73	0,00806	28,44571	56,89142
10,26	6,67	0,00899	30,05901	60,11802
11,69	7,6	0,0099	31,53909	63,07818
13,13	8,53	0,01078	32,90515	65,8103
14,56	9,47	0,01162	34,17201	68,34402
16	10,4	0,01202	34,75323	69,50646
17,44	11,33	0,01274	35,76723	71,53446
18,87	12,27	0,01342	36,71807	73,43614
20,31	13,2	0,01392	37,39835	74,7967
21,74	14,13	0,01488	38,6561	77,3122
23,18	15,07	0,0151	38,94725	77,8945
24,62	16	0,01558	39,56051	79,12102

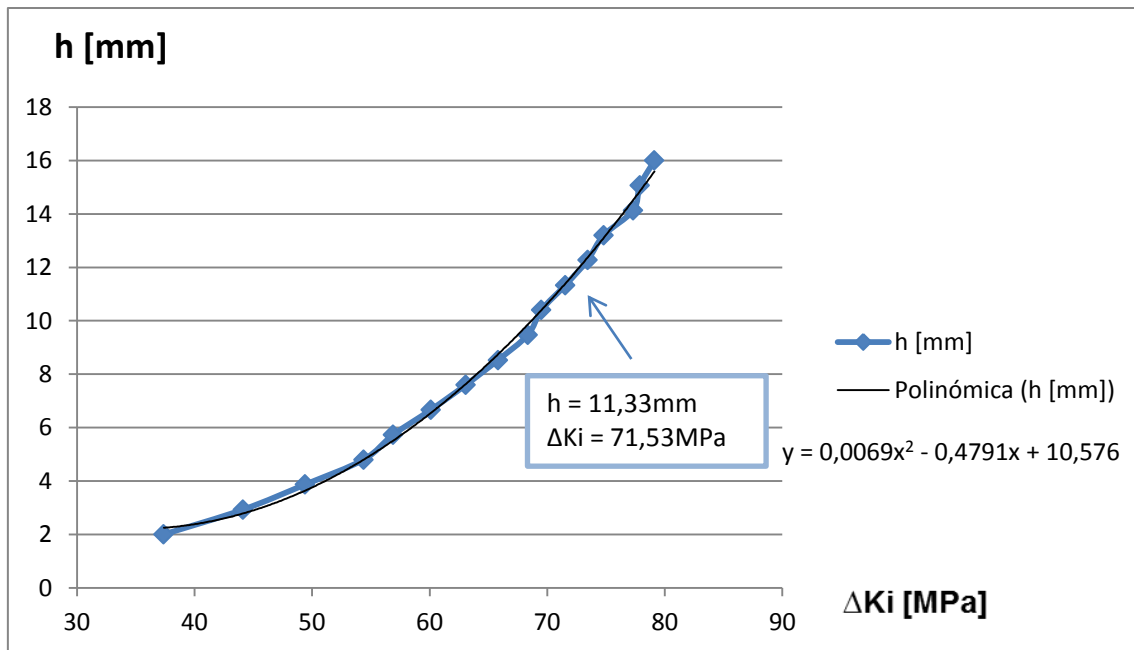


Figura 71. Evolución de ΔK_i con la profundidad de la grieta h

Observando la figura 71, podemos ver cómo va aumentando el valor del factor de intensidad de tensiones (FIT) a medida que aumentamos la profundidad de la grieta (h). Esta evolución se ajusta a una curva cuya ecuación es $y=0,0069x^2 - 0,4791x + 10,576$.

El valor de la tenacidad a fractura del material y su valor correspondiente de profundidad de la grieta queda resaltado en la misma figura.

8.5 Resultados tensión máxima y vida del componente

A través de Creo Parametric es posible la obtención de resultados de la distribución de tensiones máxima a lo largo de la pieza en función de la profundidad de la grieta. También podemos obtener el número de ciclos de vida del componente, gracias a un análisis a fatiga en el que previamente hemos establecido unos puntos de medición a lo largo de nuestra pieza ("measures").

8.5.1 Resultado análisis estático

Los resultados de tensión máxima se muestran en la siguiente figura.

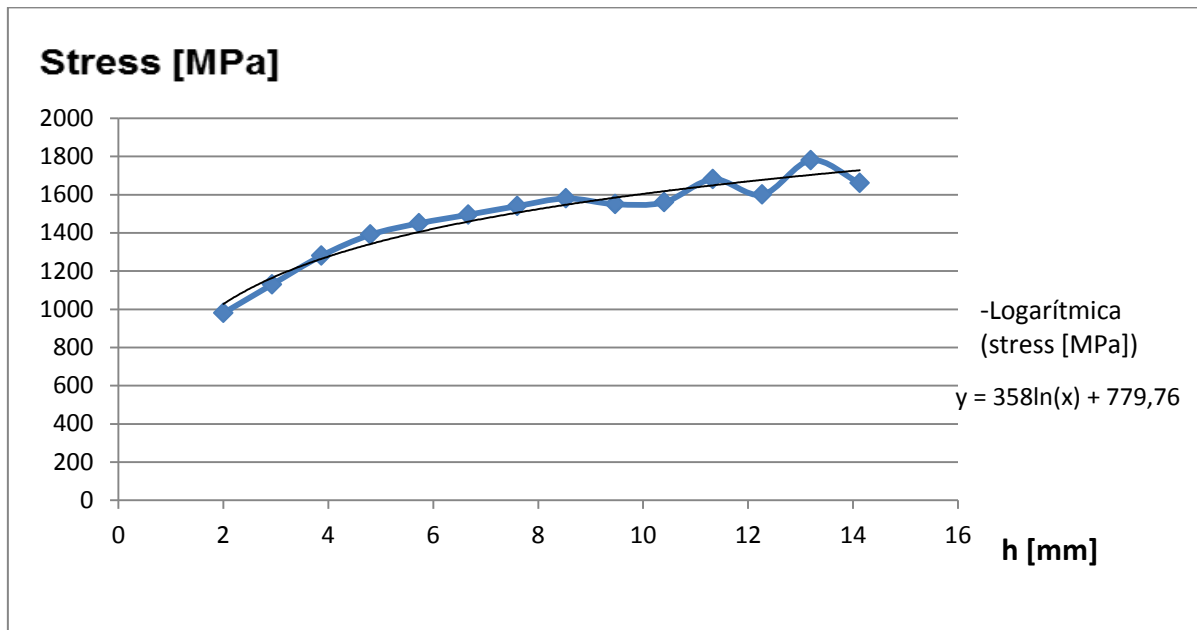


Figura 72. Tensión máxima en función de la profundidad de la grieta

Debido a las iteraciones llevadas a cabo con el software, el mallado y las condiciones de contorno se ven afectadas en cada análisis debido a los cambios en la geometría de la grieta. Sin embargo podemos apreciar claramente una tendencia creciente y prácticamente constante de la tensión máxima en concordancia con el aumento de la profundidad de la grieta.

Para un valor de profundidad de 12.7mm encontramos un aumento inesperado de la tensión máxima que podemos asociar a la propagación de la grieta al fijarnos en el anterior apartado empleando el método CTOD.

8.5.2 Resultado análisis a fatiga

En los análisis a fatiga llevados a cabo hemos obtenido los siguientes resultados.

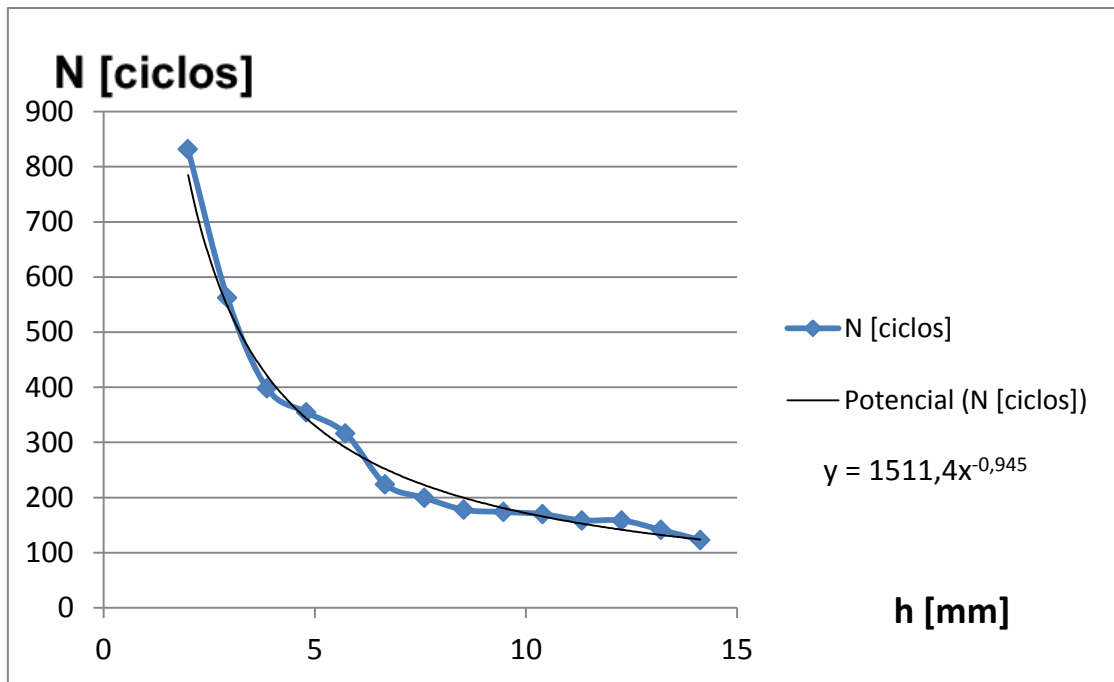


Figura 73. Vida del componente en función de la profundidad de la grieta

Podemos observar como claramente la vida del componente disminuye en los primeros valores de profundidad de la grieta, para más tarde estabilizarse pero siempre siguiendo una tendencia decreciente. Podemos distinguir la distribución de la vida del eje para una grieta de profundidad de 2,93mm en la siguiente figura.

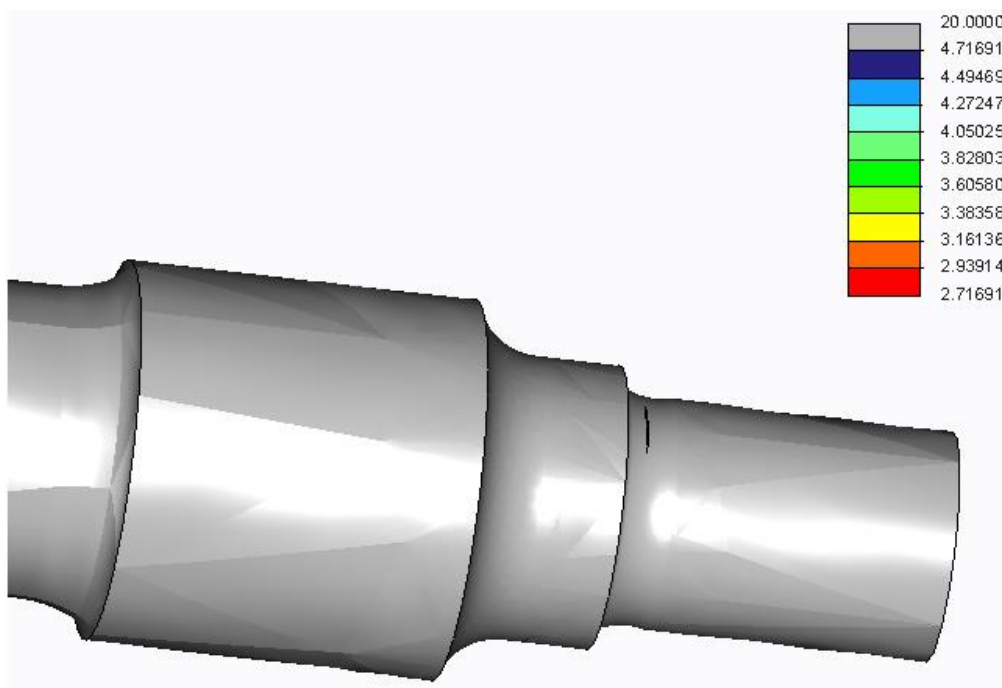


Figura 74. Distribución logN a lo largo del eje para grieta de 2,93mm

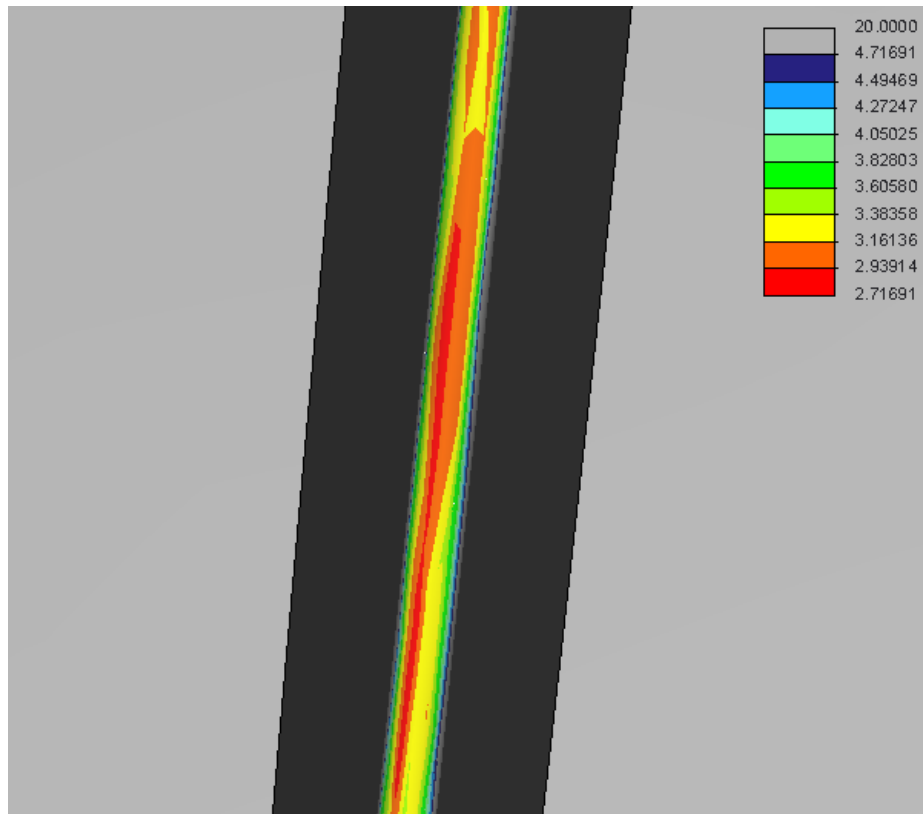


Figura 75. Distribución logN en la fisura del eje para grieta de 2,93mm

Como podemos observar en las imágenes anteriores la vida del componente en la zona no agrietada no sufre cambios aparentes, permanece constante y de valor 10^{20} ciclos.

Sin embargo donde sí que encontramos grandes cambios es en las profundidades de la grieta, alcanzando siempre los valores mínimos. En este caso el valor de la vida del elemento mecánico es de $10^{2.71}$ ciclos. Estos valores mínimos de vida del eje se localizan cercanos a las zonas de tensión máxima en el material.

Es por ello por lo que las fisuras en cualquier componente requieren nuestra máxima atención y en gran parte de situaciones recurrimos a ensayos no destructivos para la inspección de piezas y evitar así el fallo prematuro del componente.

9 Conclusiones

Hemos analizado el comportamiento de un eje sometido a unos esfuerzos, con una serie de restricciones de movimiento. Los experimentos realizados corresponden a ensayos estáticos y a fatiga.

Introduciendo unos puntos de medición en nuestro eje, concretamente en los labios de la grieta, hemos podido obtener el desplazamiento relativo de estos con sucesivas variaciones de profundidad. Gracias a estas variaciones y apoyándonos en el método de cálculo del factor “CTOD” (crack tip opening displacement) se ha podido determinar el valor del factor de intensidad de tensiones para cada valor de profundidad.

Al comparar cada valor del factor de intensidad de tensiones (FIT) con el valor de la tenacidad a la fractura del material ($73 \text{ MPa}\sqrt{m}$) se ha podido determinar que para una profundidad de grieta mayor de 11.33mm esta grieta se propaga de manera inestable.

Se ha podido estudiar la evolución de la distribución de tensiones máxima en la pieza con diferentes profundidades de fisura alcanzando valores de 1800 MPa. Estos valores tan grandes son debidos en gran medida al aumento de la concentración de tensiones en el fondo y en las paredes de la grieta con el aumento de la profundidad de la misma. Por su puesto para valores de tensión tan altos la grieta ya ha sufrido propagación y se localiza en la región III de la gráfica de crecimiento de la grieta (grieta inestable).

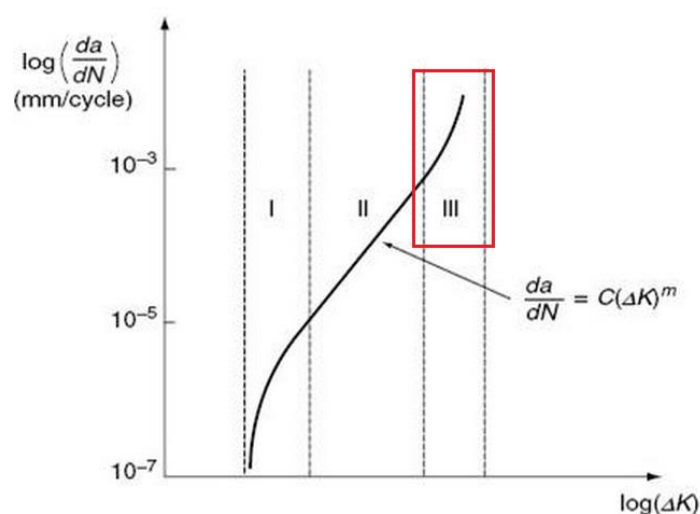


Figura 76. Tensión máxima localizada en región III

Al estudiar el comportamiento del eje fisurado a fatiga, se han llegado a obtener valores mínimos de vida del componente de 100 ciclos para los valores más grandes de profundidad de la fisura. La vida del componente guarda relación con la distribución de las tensiones máximas a lo largo de la pieza, a mayores valores de tensión, menor es la vida del componente como norma general.

Cabe destacar la rapidez y la comodidad con la que se ha podido hacer variaciones de todo tipo (geometría, cargas, restricciones) gracias al potente software empleado que ha hecho el trabajo mucho más viable.

Gracias a este tipo de programas la industria es capaz de hacer análisis fiables de componentes únicamente a partir de diseños y condiciones de funcionamiento, lo que resulta un gran avance y gran disminución de costes y tiempo invertidos, que de otra manera resultaría impensable.

Por todo lo mencionado anteriormente, hemos podido llegar a cumplir los objetivos fijados en un principio teniendo en cuenta las distintas hipótesis en las que nos hemos apoyado a lo largo del proyecto (hipótesis de cálculo en el factor CTOD, aproximación de fisuras elípticas a rectas y la hipótesis de Carpinteri entre otras).

Conociendo la longitud crítica de la fisura (11,33mm) y la vida del componente para esa longitud de fisura (158,48 ciclos) podemos utilizar la figura 76 para establecer un punto crítico a partir del cual la grieta sufre una propagación inestable (comienzo de la región III). Situar este punto en la gráfica de evolución de la grieta puede facilitar el trabajo a la hora de establecer periodos de revisión o inspección en los materiales así como poder establecer factores de seguridad con el fin de evitar en todo momento el fallo prematuro y catastrófico del elemento mecánico.

10 Presupuesto

Este presupuesto determina el coste económico del proyecto en líneas generales. El análisis sería el similar llevado a cabo por una empresa de ingeniería.

Para el cálculo de la amortización se ha tenido en cuenta un uso efectivo de 4 meses

Podemos resumir el presupuesto en la siguiente tabla.

Tabla 7. Presupuestos generales del proyecto

Cantidad	Motivo	Coste [€]	Coste efectivo [€]
Software (Licencias)			
1	Microsoft Office Professional 2013	250	83.33
1	Pro Engineer Creo 2.0 Academic Edition	0	0
Hardware			
1	Ordenador personal Toshiba Satellite P50-B-118 Intel® Core™ i7-4710HQ	949	158.16
1	Impresora multifunción Samsung SL-C460W	290	48.33
1	Costes de repuestos, encuadernación e impresión	50	50
2	Sony MicroVault USM16GR Pendrive 32 GB	44	44
100h	Estudio y análisis ingenieril [50€/h]	5000	5000
100 h	Documentación del proyecto [25€/h]	2500	2500
Coste total del proyecto			7 883.82€

Se ha tenido en cuenta una amortización de 4/24 en los equipos ordenador e impresora y una amortización de 4/12 en los equipos de software.

11 Referencias bibliográficas

1. [1]SHIGLEY, Joseph E. & MISCHKE, Charles R. Diseño en ingeniería mecánica. 6ª Edición. México 2004.
2. [2]José Luis Arana y Javier Jesús González. Mecánica de fractura. Universidad del País Vasco. (ISBN: 84-8373-455-9).
3. S. Kalpakjian, S. R. Schmid. “Manufacturing engineering and Technology” (fifth edition). Ed. Pearson Prentice Hall, 2006. (ISBN: 0-13148965-8).
4. [6]Documentación de la asignatura *Cálculo y diseño de Máquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica.4º de Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.
5. Documentación de la asignatura *Tecnología de Materiales*. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. 3º de Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.
6. [3]Eva Marco. Análisis a fatiga de un eje ferroviario mediante el programa Pro Engineer. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2010.
7. [4] Andrés García-Velasco García. Análisis paramétricos de fisuras en ejes ferroviarios – Código Pro/Engineer. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Junio 2012.
8. Manuales de Pro/ENGINEER Wildfire 5.0. Edita PTC University. 2009.
9. “Manual básico de ProEngineer Wildfire” (Universidad de Navarra). Febrero de 2004.
10. Manual proporcionado por el tutor del proyecto. *Introduction to Creo Parametric 2.0 - Fundamentals*.

11. José Ignacio López González. Multianálisis de un eje ferroviario mediante el software Pro/ENGINEER. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2011.
12. [5]Patricia Rubio Herrero. Factor de intensidad de tensiones en fisuras elípticas con mecanismo de apertura y cierre en ejes giratorios. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Febrero de 2014.
13. Kalengayi Tshilumbu, Zoser. Análisis de degradación en fatiga en ejes ferroviarios. Proyecto de fin de máster. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2012.
14. García Antúnez, Rubén. Análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria con grietas. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2013

Anexo A. Factores de concentración de tensión teóricos (K_t)

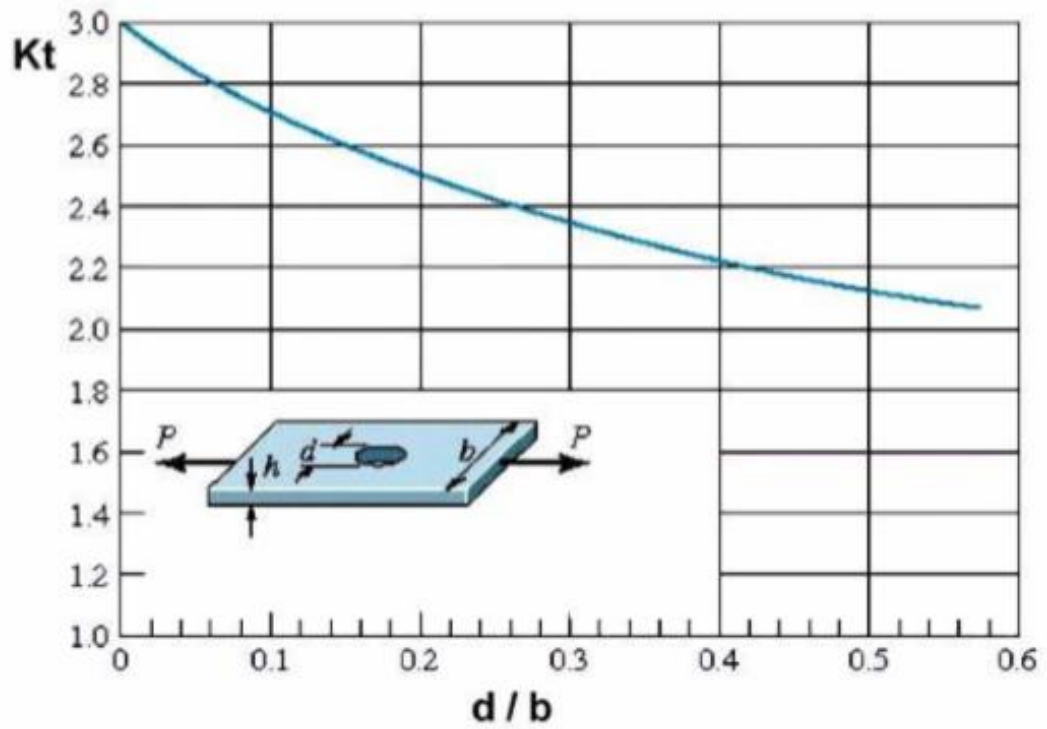


Figura 77. Barra rectangular con agujero transversal sometida a tracción o compresión

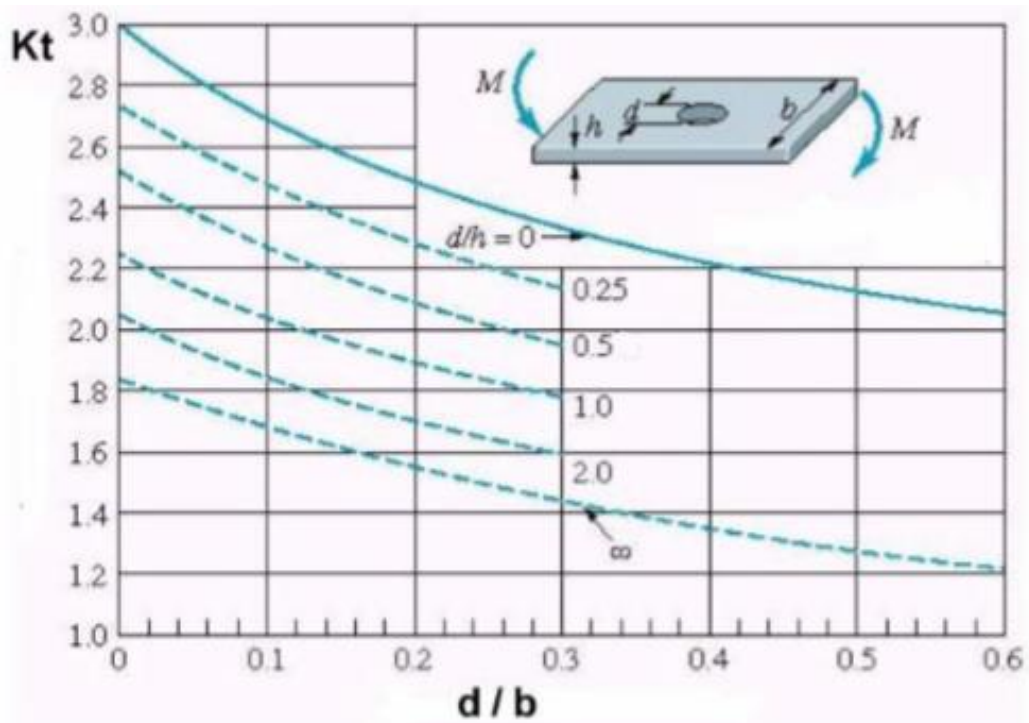


Figura 78. Barra rectangular con agujero transversal sometida a flexión simple

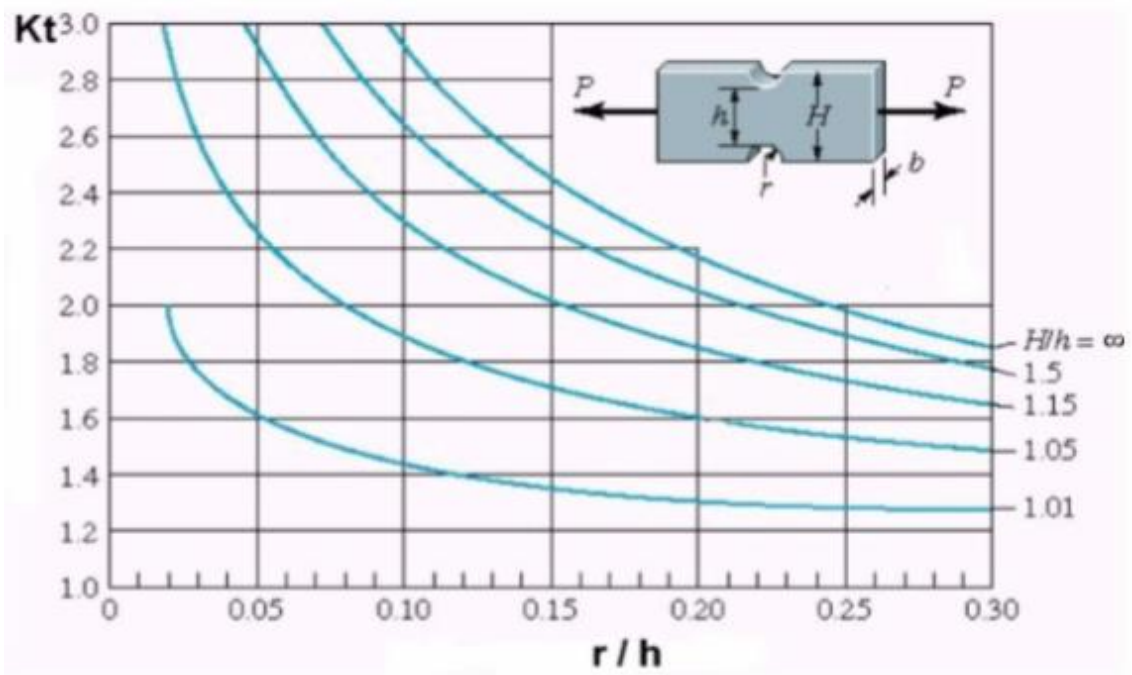


Figura 79. Barra rectangular con dos muescas sometida a tracción o compresión

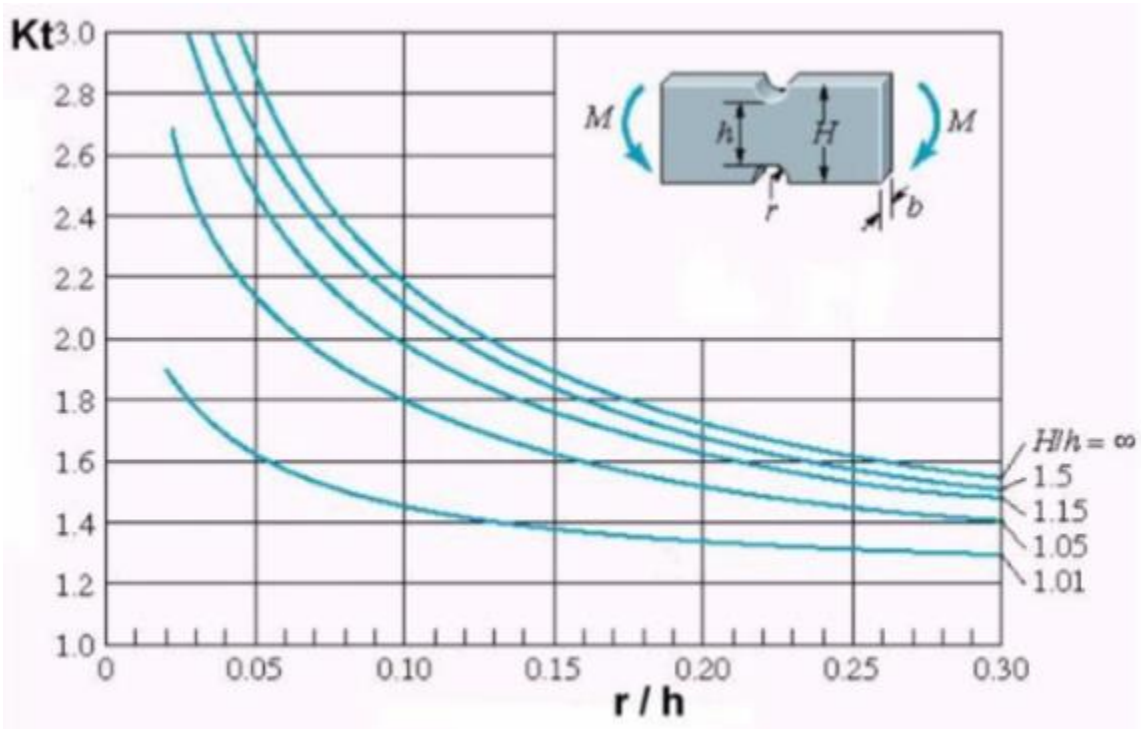


Figura 80. Barra con dos muescas sometida a flexión simple

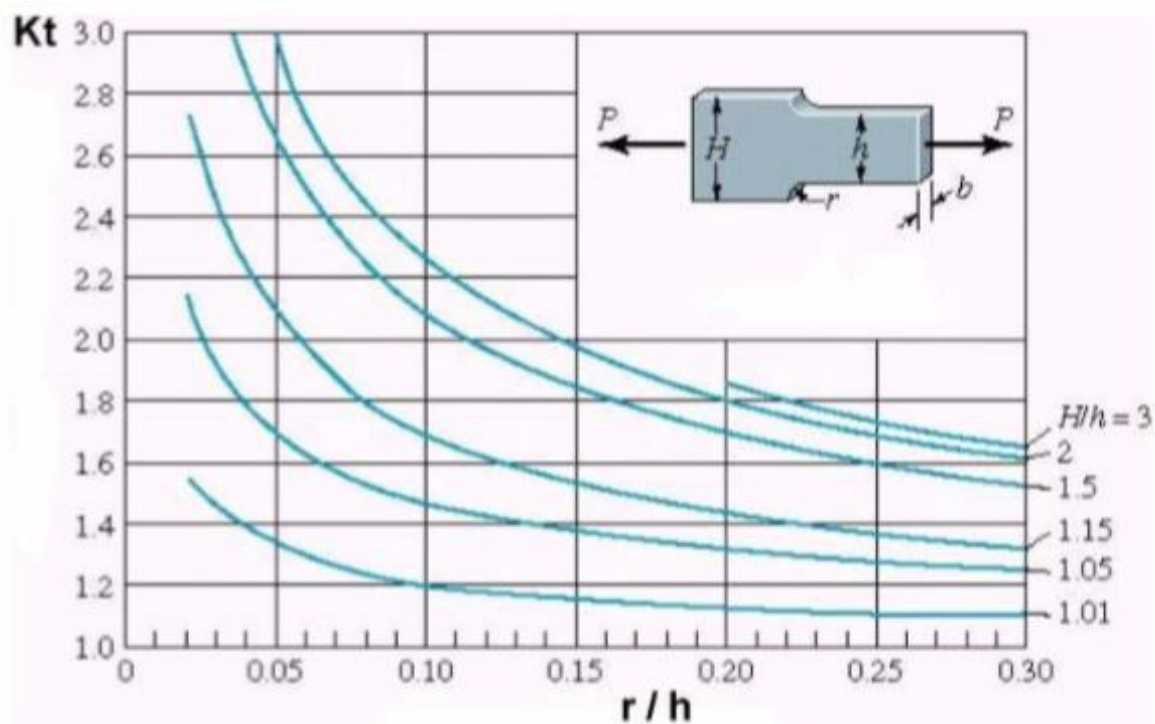


Figura 81. Barra rectangular con estrechamiento y entalles sometida a tracción o compresión

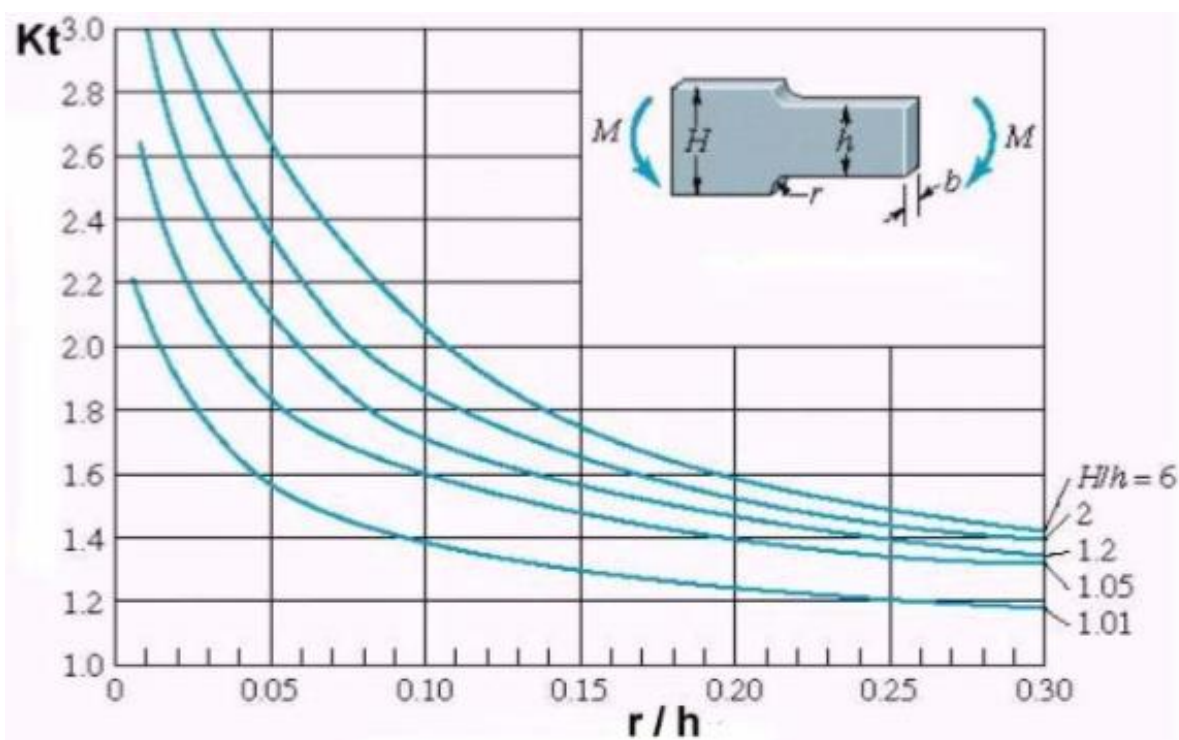


Figura 82. Barra con estrechamiento y entalles sometida a flexión simple

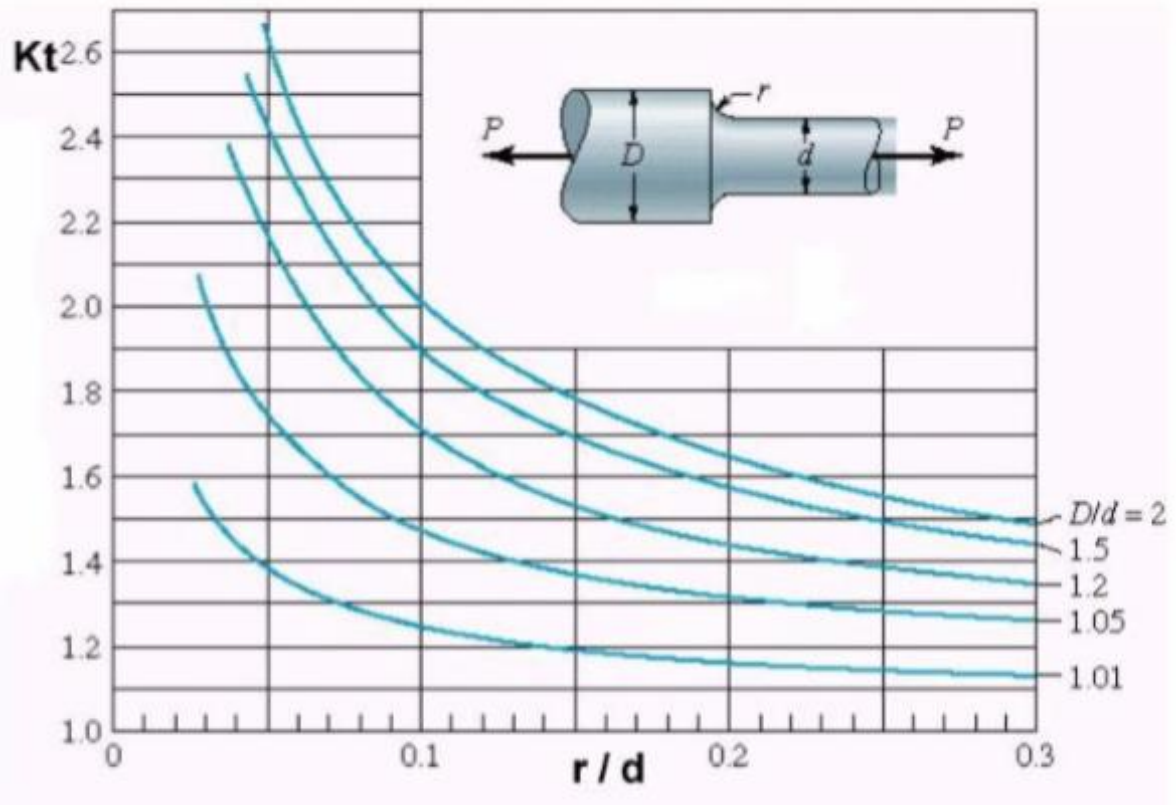


Figura 83. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a tracción

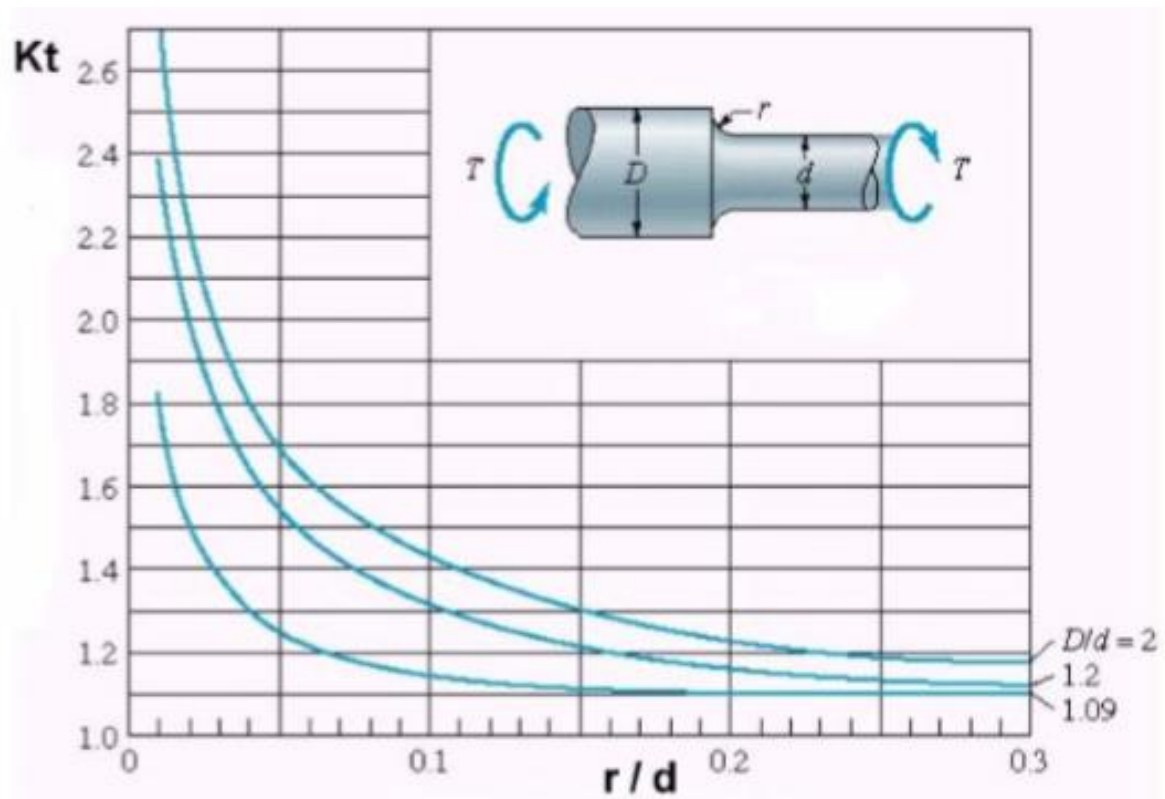


Figura 84. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a torsor

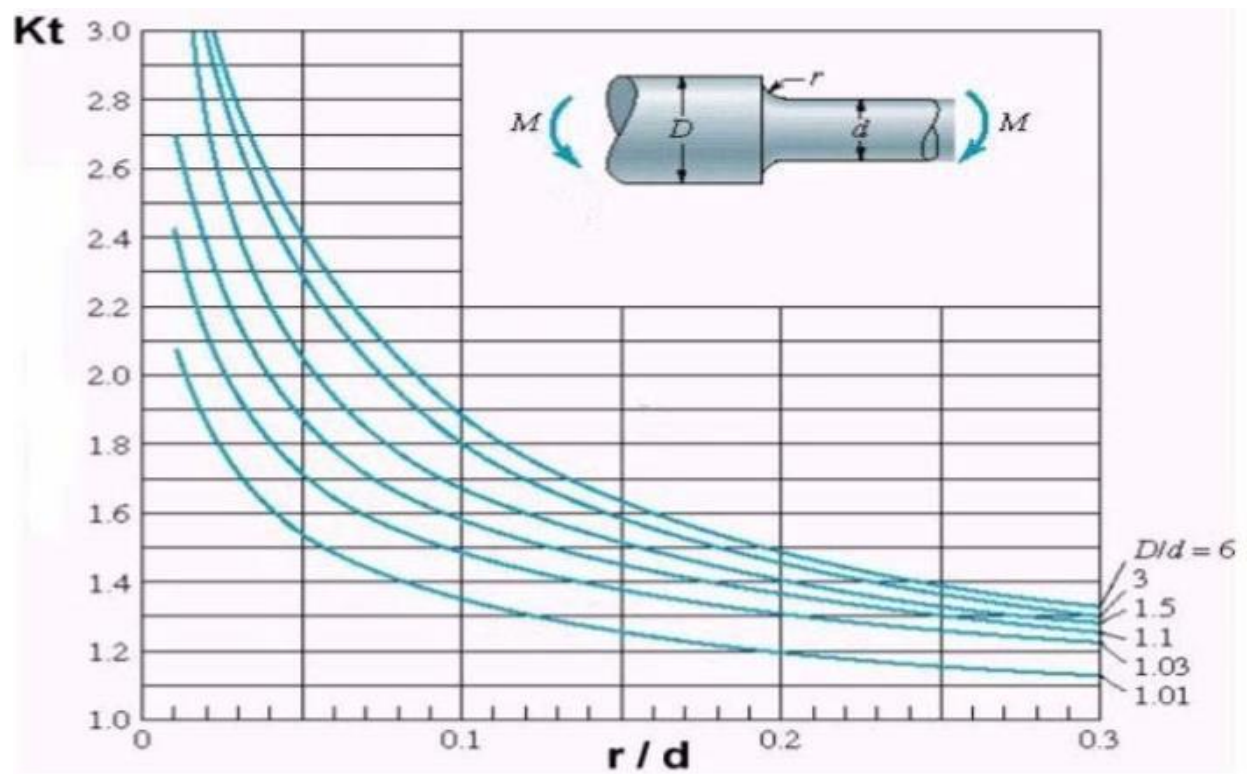


Figura 85. Barra de sección circular con estrechamiento y entalles sometida a flexión

Anexo C. Desplazamiento labio izquierdo de la grieta (punto A).

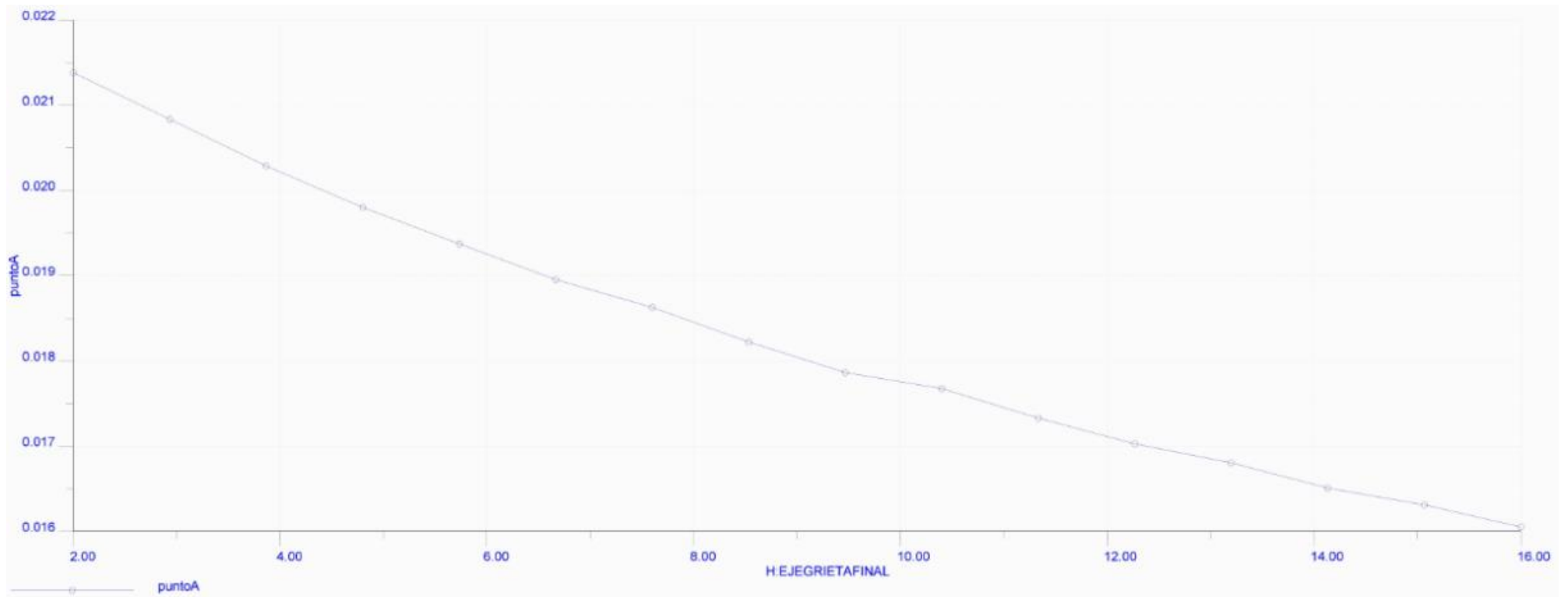


Figura 87. Desplazamiento labio izquierdo de la grieta (valores en mm)

Anexo D. Desplazamiento labio derecho de la grieta (punto B).

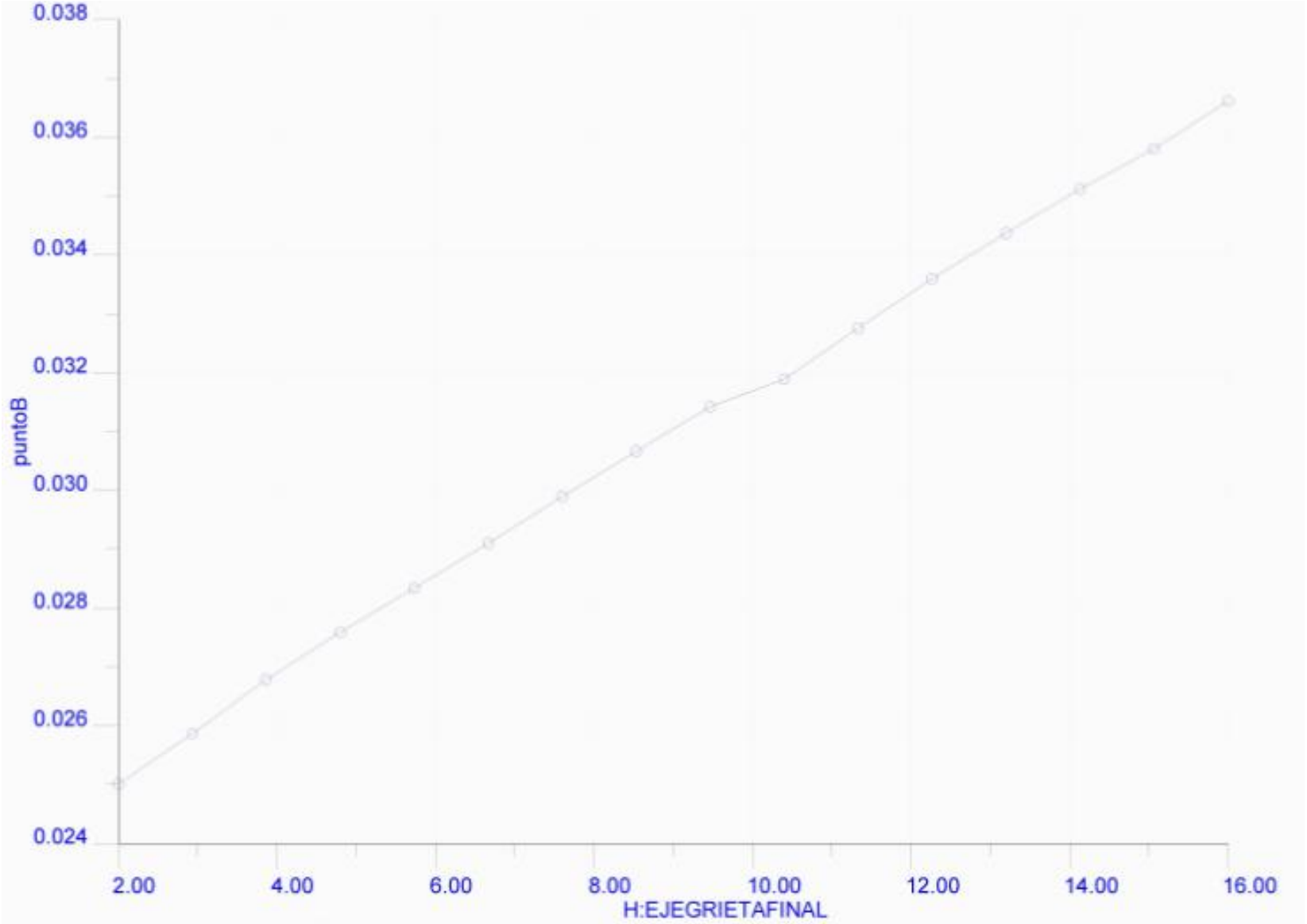


Figura 88. Desplazamiento labio derecho de la grieta (valores en mm)